

## 다각형 연료노즐에서의 NO<sub>x</sub>배출 저감 기구

조한창\* 조길원\* 이용국\* 장래웅\*  
\*포항산업과학연구원 에너지화성연구팀

### Mechanism of NO<sub>x</sub> Emission Reduction in polygonal fuel nozzle

H. C. Cho, K. W. Cho, Y. K. Lee and R. W. Chang  
Research Institute of Industrial Science & Technology

#### 1. 서론

최근 환경오염문제가 사회관심사가 되면서 엄격해지고 있는 공해물질과 온실가스배출 규제에 대응할 수 있는 저성능 연소기의 개발이 요구되고 있다. 연소기에서의 공해물질 배출은 버너부근에서의 혼합특성에 따른 화염거동과 노내 최고온도에 의해 지배된다. 고속분사를 이용한 부상화염<sup>(1)</sup>이 최근 NO<sub>x</sub> 저감기술로 각광받고 있지만, 이것 이외에 주목받고 있는 저 NO<sub>x</sub> 버너기술로는 원형버너대신 축방향의 로브(lobe)구조, 즉 버너출구에 삼각형 모양의 탭(tab)이나 굴곡가공하여 원주방향의 구조를 갖는 버너를 이용한 연구가 소개되고 있다.

유체역학자들<sup>(2)</sup>은 로브형 버너에서 로브구조에 의한 축방향 와도(streamwise vorticity)로 3차원의 원주방향 와(azimuthal vortex)가 생성되기 때문에 원형버너에 비해 혼합이 촉진된다고 밝히고 있다. 최근에는 Mitchell<sup>(3)</sup>등이 2차원 슬릿 slit)형 로브형 버너를 이용하여 CO, NO<sub>x</sub> 등의 공해물질 배출과 화염안정성 파악에 대한 기초적 연구를 수행하였는데, 등간격의 슬릿형 노즐에 비해 로브구조의 노즐에서 혼합이 촉진되어 보다 연료희박 조건에서도 연소가 가능함을 확인하였다. 또한 상류에서는 높은 스트레인률(strain rate)에 의해 휘염이 하류로 밀리고 증대된 부분 예혼합성(partial premixedness)에 의해 청염부위가 보다 넓게 발생함을 보고하였다. 하지만 부분에혼합성의 증대로 늘어난 청염은 수트(soot) 발생량 감소에 따른 복사 열손실량의 감소 및 화염온도 상승을 유발하여 NO<sub>x</sub>를 증가시킬 수 있다고 밝히고 있다.<sup>(4)(5)</sup> 이에 따라 부분 예혼합성의 향상이 항상 바람직한 것은 아니며, NO<sub>x</sub> 저감에 유리한 조건이 있을 것이라 생각하였다.<sup>(4),(6)</sup> 로브구조와 유동조건에 따른 NO<sub>x</sub> 배출 자료의 축적을 통해 로브구조와 NO<sub>x</sub> 배출간의 상관관계를 파악할 필요가 있다.

본 연구에서는 여러 형태의 로브형 버너와 운전조건에 따른 실험을 통해 공해물질 배출 특성을 파악하고자 한다. 이를 통해 로브구조에 따른 공해물질 배출특성으로부터 공해물질의 배출저감 정도와 저 NO<sub>x</sub> 버너기술로의 사용가능성을 판단하고자 한다. 본 연구에서는 로브구조, 연료와 공기의 유량과 당량비, 그리고 공기 온도 등을 실험변수로 채택하였다.

#### 2. 실험장치 및 방법

로브형 버너를 갖는 원통형 연소기는 Fig.1과 같이 연료와 산화제를 정량으로 공급하는 유로계(flow system), 점화기, 그리고 연소기 등으로 구성되어 있다. LPG는 볼 밸브, 정압계(regulator)와 니이들 밸브를 차례로 거치면서 유량이 정량으로 조절된 다음 연소기로 공급된다. 공기는 송풍기, 볼밸브, 정압계, 유량계, 니이들 밸브, 예열기를 거쳐 연료와 동축관의 배관을 통해 연소기로 공급된다. 여기서 전기 예열기는 공기를 773K까지 예열할 수 있다. 화염의 초기 점화에만 이용되는 점화기는 버너 출구면에 10mm의 구멍을 내서 부착하였다. 화염가시화를 통해 화염 모습과 화염거동을 파악하기 위해 연소기는 길이 1200mm, 직경

144mm의 투명한 석영관으로 구성하였다.

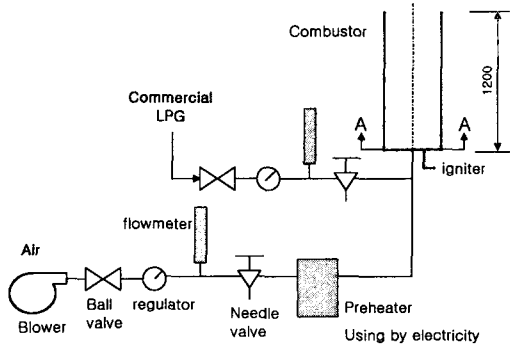


Fig.1 Schematic diagram of experimental setup

로브구조를 갖고 있다. 이때 외벽 로브는 버너 B의 내부 로브에 1.5mm의 균일두께를 갖도록 제작되었다. 즉 공기분사면적이 원형인 버너 A와 B에 비해 약간 커지고 유속이 다소 작아질 수 있으나 그 영향은 매우 적다. 버너 D는 연료 분사구와 공기 분사구의 내벽 모두에 4개씩의 로브를 갖도록 제작하였다.

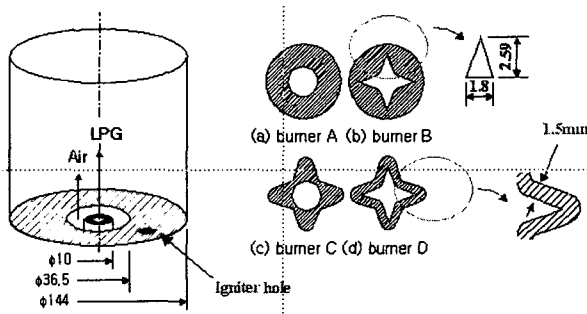


Fig.2 Combustor and burner shape

Fig.2는 연소기 모양과 사용된 4종류의 버너 단면도를 도시한 것이다. 버너 A는 원형노즐로 내경 4mm, 두께 3mm의 스테인레스관으로 연료가 공급되고 공기는 내경 36.5mm의 동축관을 통해 분사된다. 버너 B는 높이 2.59mm, 넓이 1.8mm의 로브 4개를 조합하여 구성된 연료분사구를 통해 연료가 공급되는데 연료분사면적이 버너 A와 동일하다. 버너 C에서 연료는 내경 4mm의 원형관을 통해 공급되고 관의 외벽이 4개의

연소기내 화염거동을 알아보기 위해 셔터속도 1/60, 노출 3.5로 화염의 직접사진을 얻었다. 버너 출구로부터 100cm하류에 프루브를 삽입하여 가스를 포집하고 NOx분석기 (Madur electronics GA-40T plus)를 이용하여 CO와 NOx를 측정하였다. NOx 분석기에서 데이터가 완전히 안정화된 후에 그 결과를 읽고 여러 번의 시도를 통해 그 오차를 5%이내로 최소화하였다.

### 3. 결과 및 고찰

버너형태에 따른 화염안정화 선도를 파악하기 위하여 안정된 화염을 얻을 수 있는 연료와 공기의 유속구간을 확인해 보았다. Fig.3은 연료유속을 일정하게 놓고 공기유속을 증가시켜 얻은 화염안정화 선도이다. 도시된 지점의 왼쪽영역이 안정된 부착화염 영역이고 오른쪽영역이 화염날림 구간이다. 본 연구에서 화염날림은 화염이 부착이나 부상된 상태로 5분 이상 지속되지 못하고 소멸된 경우로 정의하였다. 본 유동장에서는 비교적 약한 교란에도 부상화염이 소멸되어 부상화염 구간을 얻을 수 없었다.

버너 A와 B에서 버너 C와 D버너에 비해 보다 월등히 넓은 화염안정화 영역을 갖고 있었으며, 이들은 서로 완전히 다른 경향을 갖고 있었다. 즉 버너 A와 B는 하나의 공기유속에 대하여 두 개의 화염날림 구간이 존재하는 반타원형의 안정화 선도를 보이지만, 버너 C, D는 선형적인 화염날림구간을 갖고 있었다. 그리고 버너 A는 B에 비해 저속에서도 화염날림이 발생하기는 하지만 보다 큰 반원의 안정화 선도를 갖고 있었다.

Fig.3에서 버너 A와 B의 화염날림이 버너 C와 D의 것과 많이 떨어진 위치에서 관찰되는데, 이는 노즐 림이 화염 안정기의 역할을 하기 때문이다. 넓고 균일한 노즐 림의 버너 A가 가장 넓은 화염안정화 영역을 갖고 있었으며, 비균일한 노즐 림을 갖는 버너 B, 좁고 비

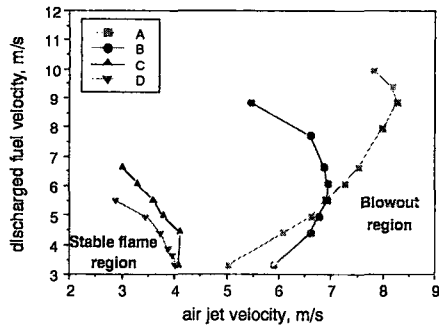


Figure 3. Flame stability at 293K

동일하면 동일한 화염날림 유속이 얻어져야 한다. 그러나 같은 연료분사면적을 갖고 형상이 다른 본 연구에서 화염날림 유속에 차이가 발생하였다. 그러면 왜 서로 다른 연료분사속도에서 화염날림이 발생하는가? 버너출구의 로브구조가 유동과 벽면의 접촉길이를 증대시키기 때문에 반경방향으로 보다 큰 속도구배와 강한 원주방향 와도에 의해 혼합이 증대되면서 화염날림 속도가 변화되는 것으로 판단된다. 그러므로 화염날림을 위한 연료유속의 결정에 벽면효과가 고려된 새로운 변수가 도입되어야 함을 알 수 있었다.

사용된 버너에서 당량비, 연료유량, 공기온도 등을 변수로 화염 후단의 CO와 NOx 배출량을 계측하였다. 공기온도는 상온과 773K의 예열온도를 채택하여 사용하였다. 293K의 상온 공기를 사용하였을 때의 NOx 배출농도를 Fig.4에 EINOx를 Fig.5에 도시하였다. 연료유속은 3.32m/s와 4.42m/s 등의 두 조건을 채택하였다. 얻어진 NOx의 대부분은 NO였으며 NO<sub>2</sub>는 거의 검출되지 않았다. 전체적으로 발생하는 NOx양은 매우 적었는데 이는 적은 연료유량이 사용되어 화염세기가 매우 낮았기 때문이다. 당량비를 0.4에서 1.0부근까지 증가시켰을 때 NOx농도는 다소 증가하였다. 이것은 기존 연구자들의 연구결과와 동일한 경향이지만 급격한 구배는 관찰되지 않았다. 연료유속을 증가시켰을 때 NO는 약간 증가되었다. NOx는 버너형태에 큰 영향을 받지는 않았으나 버너 B가 가장 적은 EINOx를 보였다.

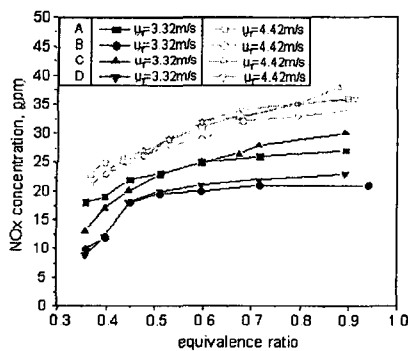


Fig. 4 NOx concentration at the air of 293K

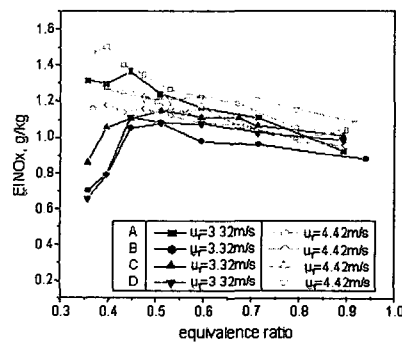


Fig. 5 EINOx at the air of 293K

단위연료당 질소산화물의 배출량을 도시한 Fig.5의 EINOx로부터 버너와 연료유속에 관계없이 당량비 0.5이상에서는 약간씩 EINOx가 적어지는 것을 알 수 있으며, 버너 B에서 가장 적은 양의 EINOx 발생하였다.

773K로 예열된 공기를 사용하였을 때의 버너형태에 따른 NOx, EINOx, CO 배출량을

Fig.6, 7, 그리고 8에 도시하였다. 여기서 사용한 연료유속은 5.53m/s와 11.1m/s였다. Fig.6의 NOx 배출량에서 저온의 결과와 마찬가지로 연료량 증가에 따라 NOx농도는 증가하였다. 이때 0.5이하의 당량비에서는 차이가 거의 없었지만, 당량비가 증가함에 따라 그 증가량은 더욱 증대되었다. 당량비를 0.3에서 1.0까지 증가시켰을 때, 연료유량에 따라 NOx의 발생 경향이 다른 것을 볼 수 있다. 즉 연료유량이 증가될수록 당량비 증가에 따라 NOx가 증가하고 NOx가 가장 많이 발생하는 당량비가 점차 하락되었다. 5.53m/s의 연료유속에서는 대략 0.8부근, 그리고 11.1m/s에서는 0.7부근에서 가장 많은 NOx가 배출되었다.

Fig.7에서 5.53m/s의 연료유속에서는 EINOx가 당량비 증가에 따라 계속 감소되었지만, 11.1m/s인 경우에는 당량비 0.5까지는 증가하다가 이후에는 감소하는 경향을 보인다.

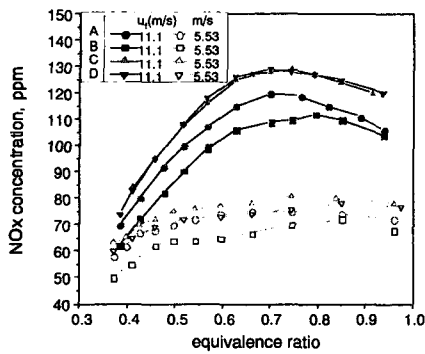


Fig. 6 NOx emission characteristics at 773K

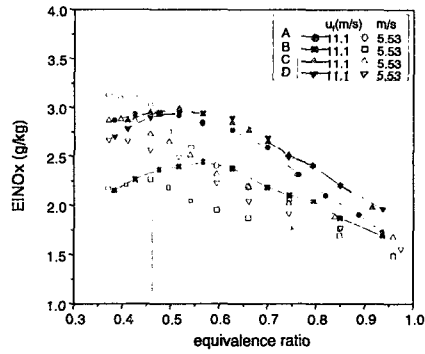


Fig. 7 EINOx trend at 773K

연료유속이 5.53m/s일 때, 버너 B에서 가장 적은 양의 NOx가 발생하였으며, 버너 A, D, C로 가면서 점차 많은 양이 발생하였다. 연료유속이 11.1m/s인 경우에서도 위와 동일한 순서로 NOx가 배출되었는데, 고온 공기를 사용하였을 때 버너형태의 영향이 더욱 증대됨을 알 수 있었다. 버너 B에서 버너 A의 원형 버너에 비해 약 5%정도 적은 NOx가 배출되었으나, 버너 C와 D에서는 오히려 많이 배출되었다.

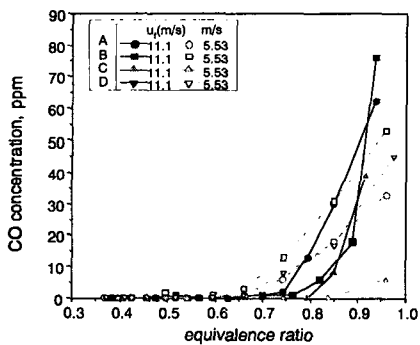


Fig. 8 CO emission characteristics at various burner types

Fig. 5와 7에서 공기를 예열하여 공급하면, EINOx 량이 급격히 증대됨을 알 수 있었다. 공기의 예열은 연소기내로 그만큼의 현열이 추가되는 것이기 때문에 전체적인 화염온도의 상승을 예상할 수 있으며, 이에 따라 NOx 배출량이 증가되는 것으로 생각할 수 있다.

Fig.8의 CO 배출결과를 보면, CO는 양론조건부근에서 가장 많이 생성되고 당량비가 낮아지면서 거의 생성되지 않았다. 일반적으로 CO는 불완전 연소과정에서 발생한다. 즉 양론조건 이상에서는 물론이고 그 이하에서도 적절한 혼합과 체류시간을 만족시키지

못했을 때에는 결국 불완전 연소가 이루어지게 되는데, 양론조건 부근에서는 반응에 참여하지 않는 산소량이 상대적으로 적기 때문에 혼합과정이 더욱 중요하게 된다. 본 연구의 버너에서도 다소의 혼합불량에 의해 불완전 연소가 이루어지는 것으로 생각할 수 있다. 특히 연소부하가 큰 11.1m/s에서 가장 많은 CO가 발생하는 것이 특이하다. 또한 CO 배출량은 연소부하와 버너형태 등의 변수에 일정한 경향을 보이지는 않았다.

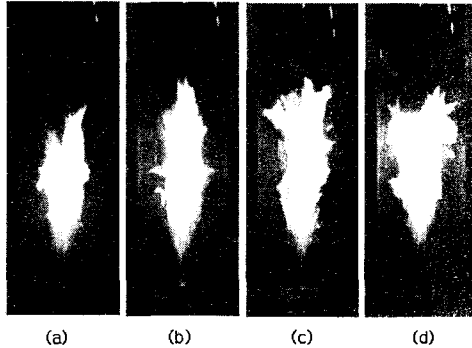


Fig 9. Direct photograph of flame at  $u_f=11.2\text{m/s}$

Fig.9은 각 버너에서 연료유속이 11.1m/s, 당량비 0.46, 공기를 773K로 예열하였을 때의 화염사진이다. 버너 C, D와 달리 버너 A, B에서의 화염인 Fig.9(a), (b)에서 버너출구부에 휘염이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 넓은 노즐 림에 재순환영역이 생성되면서 수트가 생성될 수 있는 체류시간을 제공하기 때문이다. 특히 버너 B는 버너 출구에 생성된 휘염이 후류의 휘염과 연결되어 있음을 알 수 있다. 버너 C와 D의 화염인 Fig.9(c), (d)는 노즐 림의 면적이 작아지면서 재순환영역이 좁아지고 이에 따라 휘염이 관찰되지

않는다.

Fig.9에서 화염길이를 측정하여 보면, 버너 A는 310mm, 버너 B는 가장 긴 360mm, 버너 C는 355mm, 버너 D는 349mm등이었다. 버너 A에서는 청염구간과 휘염구간이 모두 짧았다. 이에 반해 로브형 버너인 버너 B, C, D의 화염에서 버너출구에 가늘고 긴 청염이 존재하고 긴 화염길이를 얻을 수 있었다. 이는 Mitchell등 기존 연구자들의 결과와 동일한 결과이다.

버너형상과 NOx 배출과의 관계를 화염길이와 화염세기로부터 유추할 수 있다. 공급된 모든 연료는 가시화된 화염에서 모두 소모되므로 화염의 체적이 전체적인 화염세기를 나타낸다. 화염세기는 정량적으로 국부적인 화염온도(local flame temperature)와 NOx 배출량을 알 수 없지만 정성적인 경향을 알 수 있다. 화염세기의 증가는 화염온도의 증가와 이에 따른 NOx 배출량 증가를 유추할 수 있다. Fig. 7과 9에서 버너 B의 NOx 배출량이 원형버너인 버너 A에 비해 줄어드는 것은 화염길이가 증가와 화염선단에 생성된 휘염에 의한 복사열 손실 증가에 따른 화염온도 저하에 기인한다. 버너 C와 D의 경우는 비록 화염길이가 증가되지만 청염구간 역시 증가된다. 이에 따라 화염세기는 비슷한 길이를 갖는 휘염구간에 의해 거의 비슷할 것으로 예측되며, 긴 청염구간에서 저하되는 복사열손실에 의해 화염온도는 상승되고 이에 따라 NOx 생성량이 증가될 수 있다고 판단된다.

본 연구의 결과를 기존 연구자들의 결과를 이용하여 설명하면, 버너 B의 화염선단이 연료과잉 조건에서 희박조건으로 가는 가장 적당한 부분 예혼합성 특성을 갖고 있기 때문에 NOx 저감이 가능하였다는 것을 알 수 있다. 하지만 버너 C, D에서는 보다 빠른 혼합에 의해 부분 예혼합성이 과도해지기 때문에 NOx 저감에 실패는 물론 오히려 증대되었다고 할 수 있다. 그러나 이 결과로부터 어느 정도의 부분 예혼합성이 최적인지에 대한 정확한 정보를 도출할 수 없다. 왜냐하면 이것은 화염선단에서의 농도를 측정된 후에 정의할 수 있기 때문이다.

본 연구에서는 로브가 단지 4개 있는 경우에 대하여 고찰해 보았다. 이에 따라 몇 개의 로브가 있는 것이 최적의 버너인지 확인할 수 없다. 최적의 로브형 버너는 부분 예혼합성의 크기에 따라 결정될 것으로 판단되는데, 이는 로브 개수에 의해 최종적으로 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

로브형 버너를 이용한 연소기에서 당량비, 연료유량, 그리고 공기온도를 변수로 채택하여 화염가시화와 NOx, CO등의 배출가스 농도를 측정하여 다음의 결론을 도출할 수 있었다.

(1) 화염 안정성은 기존의 원형버너가 좀 더 유리하였으나, 연료나 공기측에 로브구조가 있는 경우에는 혼합이 좀 더 증대됨을 확인할 수 있었다.

(2) 화염날림을 결정하는 연료유속의 관계식에 벽면효과가 고려된 새로운 변수가 추가적으로 도입되어야 한다. 벽면효과가 버너에서는 저속의 연료 유속에서도 화염날림이 관찰되었다.

(3) 로브형 버너를 저 NO<sub>x</sub> 버너기술로 응용가능할 것으로 판단된다. 연료 분사구만이 로브구조로 된 경우가 기존 원형버너에 비해 약 5%정도 저감된 NO<sub>x</sub>를 배출시켰다. 이것은 화염이 장염화되면서 화염의 세기가 저하되었기 때문이다. 그러나 공기 분사구만 로브형으로 된 버너와 연료와 공기의 분사구가 모두 로브형으로 된 버너에서는 화염이 장염화되지만 청염구간도 증가되어 오히려 NO<sub>x</sub>배출량이 증가되었다.

#### 참고문헌

- (1) Tomeczek, J., Goral, H., and Gradon B., Gasdynamics abatement of NO<sub>x</sub> emission from industrial natural gas jet diffusion flames, *Combustion Science and Technology*, 1995, vol.105, pp.55-65
- (2) McVey, J. B., Observation of the effect of streamwise vorticity on the spreading of flames in high speed flow, *Combustion Science and Technology*, 1988, vol.60, pp.447-451
- (3) Mitchell, M. G., Smith, L. L., Karagozian, A. R., and Smith, O. I., Burner emissions associated with lobed and non-lobed fuel injectors, *Twenty-seventh Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, 1998, pp.1825-1831
- (4) Turns, R. S., Myhr, F. H., Bandaru, R. V., and Maund, E. R., Oxidation of nitrogen emission from turbulent jet flames: Part II- fuel dilution and partial premixing effects, *Combustion and Flame*, 1993, vol.93, pp.255
- (5) Starner, S. H., Bilger, R. W., Dibble, R. W., and Barlow, R. S., Piloted diffusion flames of diluted methane near extinction: mean structure from Raman/Rayleigh fluorescence measurements, *Combustion Science and Technology*, 1990, vol.70, pp.111-133
- (6) Gore, J. P. and Zhan, N. J., NO<sub>x</sub> emission and major species concentrations in partially premixed laminar methane/air co-flow jet flames, *Combustion and Flame*, 1996, vol. 105, pp.414-427
- (7) Kalghatgi, G.T., Blowout stability of gaseous jet diffusion flames. Part II: Effect of cross wind, *Combustion Science and Technology*, 1981, vol.26, pp.241-244