

## 로브형 버너에서의 NO<sub>x</sub> 배출 특성에 관한 연구

조한창\* · 조길원\* · 이용국\*

### A Study of Characteristics of NO<sub>x</sub> Emission in Lobed Burner

H. C. Cho, K. W. Cho and Y. K. Lee

#### ABSTRACT

To evaluate the effect of lobed structure on pollutant emission, an experimental study examines NO<sub>x</sub> and CO emissions associated with four burner geometries, such as a conventional circular burner and three lobed ones. Rapid mixing allowed by the lobed burner to produce lean premixed flames, with narrower flame stability diagram than for the conventional circular one. Conventional circular burner of wide and uniform burner rim has an advantage of flame stabilization. Correlation on fuel discharge velocity for flame blowout should be included a variable related to the wall effect of the burner. NO<sub>x</sub> emission reduces by about 5% at the burner with lobed structure in fuel discharge side compared to conventional circular one. This is due to lower flame temperatures through flame elongation and increased radiative heat losses, caused by partially luminous flame in flame front. Meanwhile, at the burner with lobed structure in air discharge side and both fuel and air discharge sides, NO<sub>x</sub> emission somewhat increases with reduced radiative heat losses in spite of flame elongation. Therefore, the rapid mixing by lobed structure does not always have an advantage on NO<sub>x</sub> reduction.

**Key Words** : 로브형버너(lobed burner), 질소산화물(NO<sub>x</sub>), 화염가시화(flame visualization), 화염안정화(flame stability)

#### 1. 서 론

최근 환경오염문제가 사회관심사가 되면서 엄격해지고 있는 공해물질과 온실가스배출 규제에 대응할 수 있는 저공해 고효율 연소기의 개발 필요성이 증대되고 있다. 연소기의 연소성능과 공해물질 배출특성은 버너부근에서의 혼합특성에 따른 화염거동과 노내 최고온도에 의해 지배된다. 이에 따라 버너관련 연구들이 많이 진행되어 왔다. 고속분사를 이용한 부상화염[1]이 최근 NO<sub>x</sub> 저감기술로 각광받고 있지만, 이것 이외에 최근 주목받고 있는 저 NO<sub>x</sub> 버너기술로는 원형 버너대신 축방향의 로브(lobe)구조, 예를 들면 버너출구에 삼각형 모양의 탭(tap)을 설치하거나 굴곡가공하여 원주 방향의 구조를 갖는 버너를 이용한 연구가 소개되고 있다.

유체역학자들[2]은 로브구조에 의해 발생하는

강한 축방향 와도(streamwise vorticity)로 3 차원의 원주방향 와(azimuthal vortex)가 생성되기 때문에 로브형 버너가 일반 원형버너에 비해 혼합이 촉진된다고 밝히고 있다. 최근에는 Mitchell[3]등이 2 차원 슬릿(slit)형 로브형 버너를 이용하여 CO, NO<sub>x</sub> 등의 공해물질 배출특성과 화염안정성 파악에 대한 기초적 연구를 수행하였다. 그에 따르면 등간격의 슬릿형 노즐에 비해 로브 구조의 노즐에서 혼합이 촉진되었으며, 보다 연료희박 조건에서도 연소가 가능함을 확인하였다. 상류에서는 높은 스트레인률(strain rate)에 의해 휘염의 화염선단이 하류로 밀리면서 증대된 부분 예혼합성(partial premixedness)에 의해 청염 부위가 보다 넓게 발생하였다고 보고하고 있다. 하지만 부분 예혼합성의 증대에 의해 증대된 청염은 결국 수트(soot) 발생량의 감소를 의미하고 이는 복사 열손실량의 감소와 화염 온도의 상승을 유발함으로써 NO<sub>x</sub> 증가도 우려된다고 밝히고 있다.[4, 5] 이에 따라 부분 예혼합

\* 포항산업과학연구원 에너지/화성연구팀

성의 향상이 항상 바람직한 것은 아니며, NO<sub>x</sub> 저감에 유리한 조건이 있을 것이라 생각하였다. [4, 6] 즉 화염선단이 부분 예혼합성의 연료과잉 구간 또는 연료희박 구간에 존재하는 지에 따라 NO<sub>x</sub> 배출 특성이 결정될 것이다. 그러므로 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 배출특성을 파악하고자 한다. 이때 사용된 변수는 로브구조, 연료와 공기의 유량과 당량비, 그리고 공기 온도 등을 채택하였다. 로브구조에 따른 공해물질 배출특성으로부터 공해물질의 배출저감 정도와 저 NO<sub>x</sub> 버너기술로의 사용가능성을 판단하고자 한다. 이를 근거로 공해물질 저감을 위한 최적의 로브형 버너를 제시하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

로브형 버너를 갖는 원통형 연소기는 Fig.1 과 같이 연료와 산화제를 정량으로 공급하는 유로계(flow system), 점화기, 그리고 연소기 등으로 구성되어 있다. LPG 는 볼 밸브, 정압계(regulator)와 니들 밸브를 차례로 거치면서 유량이 정량으로 조절된 다음 연소기로 공급된다. 공기는 송풍기, 볼밸브, 정압계, 유량계, 니들 밸브, 예열기를 거쳐 연료와 동축관의 배관을 통해 연소기로 공급된다. 여기서 전기 예열기는 공기를 773K 까지 예열할 수 있으며, 송풍기로부터의 유량변동을 최소화하기 위하여 사용되는 공기유량이 최소 20 초이상 체류할 수 있도록 크게 제작하였다. 화염의 초기 점화에만 이용되는 점화기는 버너 출구면에 10mm 의 구멍을 내서 부착하였다. 실험으로부터 점화기가 부착된 축방향 위치에서 수트라인(soot line)이 약간 상류에 위치하는 약간의 유동교란이 있었다. 화염가시화를 통해 화염 모습과 화염거동을 파악하기 위해 연소기는 길이 1200mm, 직경 144mm 의 투명한 석영관으로 구성하였다.

Fig.2 는 연소기 모양과 사용된 버너의 단면도를 도시한 것이다. 버너는 총 4 종류가 사용되었다. 먼저 type 1 은 일반적인 원형노즐로 내경 4mm, 두께 3mm 의 스테인레스관을 통해 연료가 공급되고 공기는 내경 36.5mm 의 동축관을 통해 분사된다. Type 2 는 높이 2.59 mm 넓이 1.8mm 의 로브 4 개를 조합하여 구성된 연료분사구를 통해 연료가 공급되며, 이때 연료분사면적은 내경 4mm 인 type 1 의 연료

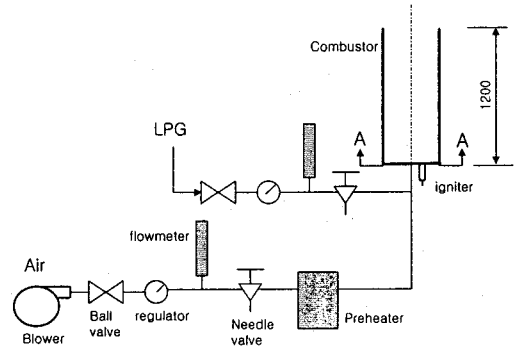


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

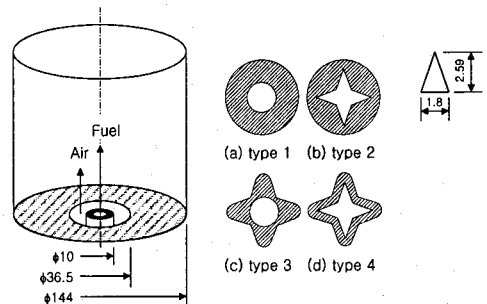


Fig.2 Schematic diagram of combustor and burner shape

분사면적과 동일하다. 또한 노즐의 외경도 type 1 의 외경과 동일한 10mm 이다. Type 3 에서 연료는 내경 4mm 의 원형관을 통해 공급되고 관의 외벽이 4 개의 로브구조를 갖고 있다. 이때 외벽의 로브는 type 2 의 내부 로브 4 개에 1.5mm 의 균일두께를 갖도록 제작되었다. 이에 따라 공기분사면적이 원형인 type 1, 2 에 비해 약간 커지기 때문에 유속이 다소 작아질 수 있으나 이에 의한 영향은 무시할 수 있을 정도로 적다. Type 4 는 연료 분사구와 공기 분사구의 내벽 모두에 4 개씩의 로브를 갖도록 제작하였다.

연소기내 화염거동을 알아보기 위해 Kodak 카메라를 이용하여 셔터속도 1/60, 노출 3.5 로 화염의 직접사진을 얻었다. 공해물질 배출특성을 파악하기 위해 버너 출구로부터 100cm 하류에 프루브를 삽입하여 가스를 포집하고 NO<sub>x</sub> 분석기(Madur electronics GA-40T plus)를 이용하여 CO와 NO<sub>x</sub> 를 측정하였다. NO<sub>x</sub> 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 왼쪽 영역이 안정된 부착화염 영역이고 오른쪽 영역이 화염날림 구간이다. 본 연구에서 화염날림은 화염이 부착이나 부상된 상태로 5 분이상 지속 되지 못하고 소멸된 경우로 정의하였다. 본 유동장에서는 비교적 약한 교란에도 부상화염이 소멸되어 부상화염 구간을 얻을 수 없었다.

Type 1, 2 버너에서 type 3, 4 버너에 비해 보다 월등히 넓은 화염안정화 영역을 갖고 있었으며, 이들은 서로 완전히 다른 경향을 갖고 있었다. 즉 type 1, 2는 하나의 공기유속에 대하여 두 개의 화염날림 구간이 존재하는 반타원형의 안정화 선도를 보이지만, type 3, 4는 선형적인 화염날림구간을 갖고 있었다. 그리고 type 1은 2에 비해 저속에서도 화염날림이 발생하기는 하지만 보다 큰 반원의 안정화 선도를 갖고 있었다.

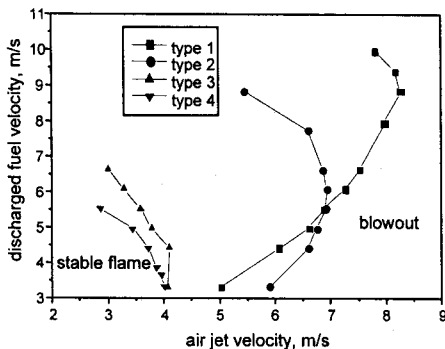


Fig.3 Flame stability diagram in confined flow field

Fig.3에서 type 1과 2 버너의 화염날림이 type 3과 4 버너의 것보다 많이 떨어진 위치에서 관찰되는데, 이는 노즐 림이 화염 안정기의 역할을 하기 때문이다. 넓고 균일한 노즐 림의 type 1이 가장 넓은 화염안정화 영역을 갖고 있었으며, 비균일한 노즐 림을 갖는 type 2, 좁고 비균일한 노즐 림을 갖는 type 3과 4로 가면서 화염안정화 영역이 좁아졌다. 본 연구에서 사용한 4개의 노즐은 모두 비교적 넓은 노즐 림을 갖고 있어 노즐 출구에 비교적 큰 재순환 영역이 생성되면서 이것이 화염 안정성을 증대시킨 것으로 사료된다. 특히 type 1과 2는 3과 4에

비해 넓은 노즐 림을 갖고 있어 화염 안정성이 증대되는 것으로 사료된다.

화염날림의 연료유속[7]은 연료분사 직경, 최대 총류 연소속도, 연료/공기의 밀도비, 연료의 동점성계수, 그리고 양론비에서 연료의 질량분률에 의해 결정된다. 즉 연료분사구의 면적이 동일하면 동일한 화염날림 유속이 얻어져야 한다. 그러나 비록 노즐 림의 두께가 달라 재순환 영역의 영향에 따라 화염날림유속이 영향을 받을 수 있을 것으로 사료되나, 형상이 다른 연료분사면적을 갖는 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.

여러 로브형 버너를 이용하였을 때 CO와 NO<sub>x</sub> 배출량을 측정하였다. 이때 사용된 변수는 당량비, 연료유량, 그리고 공기온도 등이었다. 당량비는 공기과잉조건에서 연료유량이 결정되면 그에 맞게 공기유량을 결정하였다. 공기온도는 상온과 773K로 예열된 두 가지 조건을 채택하여 사용하였다.

293K의 상온 공기를 사용하였을 때 배출되는 NO<sub>x</sub> 농도를 Fig.4에 EINO<sub>x</sub>를 Fig.5에 도시하였다. 연료유속은 3.32m/s와 4.42m/s 등의 두 조건을 채택하였다. 얻어진 NO<sub>x</sub>의 대부분은 NO였으며 NO<sub>2</sub>는 거의 검출되지 않았다. 또한 전체적으로 발생하는 NO<sub>x</sub> 양은 매우 적었다. 적은 연료유량이 사용되어 화염세기가 매우 낮기 때문에 NO<sub>x</sub>가 적게 검출된다. 당량비를 0.4에서 1.0 부근까지 증가시켰을 때 NO<sub>x</sub> 농도는 다소 증가하였다. 이것은 기존 연구자들의 연구결과와 동일한 경향이지만 급격한 구배는 관찰되지 않았다. 연료유속을 증가시켰을 때 NO는 약간 증가되었다.

NO<sub>x</sub>는 버너형태에 거의 무관하게 배출되었다. 3.32m/s의 연료 유속에서는 type 2, 4 버너가 type 1, 3 버너에 비해 약간 적은 NO<sub>x</sub>가 배출되었다. 그러나 4.42m/s인 경우에는 차이가 거의 없었다.

Fig.4를 단위연료당 질소산화물의 배출량을 도시한 Fig.5의 EINO<sub>x</sub>로부터 버너와 연료유속에 관계없이 당량비 0.5 이상에서는 약간씩 EINO<sub>x</sub>가 적어지는 것을 알 수 있으며, type 2의 경우에서 가장 적은 양의 EINO<sub>x</sub> 발생하였다.

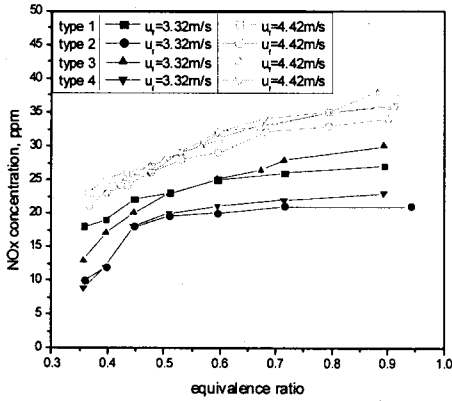


Fig.4 NOx emission with air of 293K

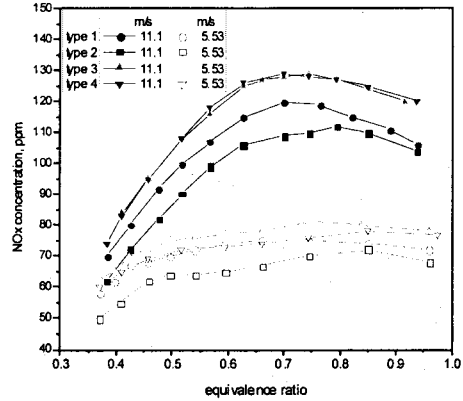


Fig.6 NOx emission with preheated air of 773K

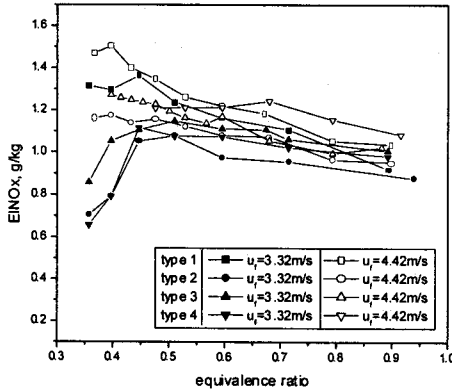


Fig.5 EINOx with air of 293K

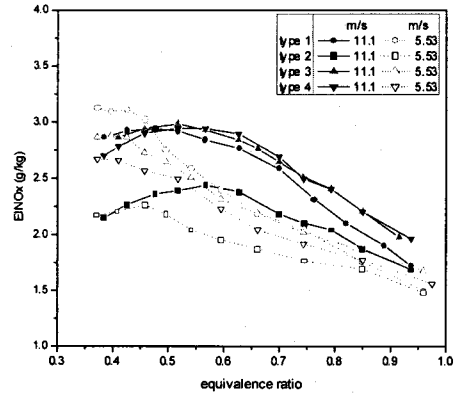


Fig.7 EINOx with preheated air of 773K

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, 연료유량이 많은 경우와 적은 경우에 따라 NOx의 발생 경향이 다른 것을 볼 수 있다. 즉 연료유량이 적은 경우에는 당량비 증가에 따라 NOx가 증가하지만, 5.53m/s 이상에서는 당량비 0.3과 1.0의 중간 당량비에서 가장 많은 NOx가 배출되었다. 5.53m/s의 연료유속에서는 대략 0.8부근, 그리고 11.1m/s에서는 0.7부근에서 가장 많은 NOx가 배출되었다.

Fig.7의 5.53m/s 연료유속에서는 EINOx이

당량비 증가에 따라 계속 감소되었지만, 11.1m/s인 경우에는 당량비 0.5까지는 증가하다가 이후에는 감소하는 경향을 보인다.

연료유속이 5.53m/s일 때, 다른 버너형태에 비해 type 2버너에서 가장 적은 양의 NOx가 발생하였으며, type 1, 4, 3의 버너로 가면서 점차 많은 양이 발생하였다. 연료유속이 11.1m/s인 경우에서도 위와 동일한 순서로 NOx가 배출되었는데, 고온 공기를 사용하였을 때 버너 형태의 영향이 더욱 증대됨을 알 수 있었다. type 2 버너에서 type 1의 원형 버너에 비해 약 5% 정도 적은 NOx가 배출되었으나, type 3과 4의 버너에서는 오히려 많이 배출되었다.

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

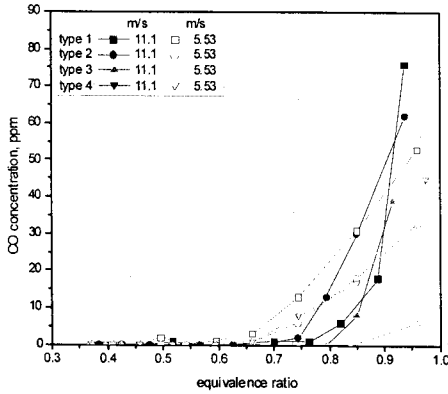


Fig.8 CO concentration with preheated air of 773K

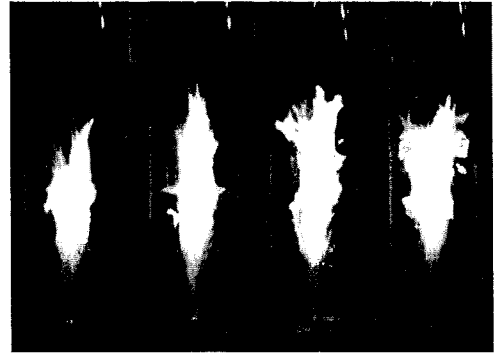


Fig.9 Direct photographs of flame with preheated air of 773K

Fig.8 의 CO 배출결과를 보면, CO 는 양론 조건부근에서 가장 많이 생성되고 당량비가 낮아 지면서 거의 생성되지 않았다. 일반적으로 CO 는 불완전 연소과정에서 발생한다. 즉 양론 조건 이상에서는 물론이고 그 이하에서도 적절한 혼합과 체류시간을 만족시키지 못했을 때에는 결국 불완전 연소가 이루어지게 되는데, 양론 조건 부근에서는 반응에 참여하지 않는 산소량이 상대적으로 적기 때문에 혼합과정이 더욱 중요하게 된다. 본 연구의 버너에서도 다소의 혼합 불량에 의해 불완전 연소가 이루어지는 것으로 생각할 수 있다. 특히 연소부하가 큰 11.1m/s 에서 가장 많은 CO 가 발생하는 것이 특이하다. 또한 CO 배출량은 연소부하와 버너형태 등의 변수에 일정한 경향을 보이지는 않았다.

Fig.9 은 각 버너에서 연료유속이 11.1m/s, 당량비 0.46, 공기를 773K 로 예열하였을 때의 화염사진이다. Type 3, 4 와 달리 type 1, 2 의 버너를 이용하였을 때의 화염인 Fig.9(a), (b) 에서 버너출구부에 휘염이 발생하는 것을 볼 수 있는데 이는 넓은 노즐 림에 재순환영역이 생성되면서 수트가 생성될 수 있는 체류시간을 제공하기 때문이다. 특히 type 2 는 버너출구에 생성된 휘염이 후류의 휘염과 연결되어 있음을 알 수 있다. type 3 과 4 인 Fig.9(c), (d)는 노즐 림의 면적이 작아지면서 재순환영역이 좁아지고 이에 따라 휘염이 관찰되지 않는다.

Fig.9 에서 화염길이를 측정하여 보면, type 1 은 310mm, type 2 는 가장 긴 360mm, type 3 는 355mm, type 4 는 349mm 등이었다. Type 1 에서는 청염구간과 휘염구간이 모두 짧았다. 이에 반해 로브형 버너인 type 2, 3, 4 의 화염에서 버너출구에 가늘고 긴 청염이 존재하고 긴 화염길이를 얻을 수 있었다. 이는 Mitchell 등 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. 화염 세기는 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. 7 과 9 에서 type 2 의 NOx 배출량이 원형버너인 type 1 에 비해 줄어드는 것은 화염길이 증가와 화염선단에 생성된 휘염에 의한 복사열손실 증가에 따른 화염온도 저하에 기인한다. type 3 과 4 의 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, type 2 버너의 화염선단이 연료과잉 조건에서 희박조건으로 가는 가장 적당한 부분 예혼합성 특성을 갖고 있기 때문에 NOx 저감이 가능하였다는 것을 알 수 있다. 하지만 type 3, 4 버너에서는 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 4 개 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 NO<sub>x</sub>, CO 등의 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 관찰 되었다.
- (3) 로브형 버너를 저 NO<sub>x</sub> 버너기술로 응용 가능할 것으로 판단된다. 연료 분사구만이 로브 구조로 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*, Vol. 105, 1995, 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*, Vol. 60, 1988, 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*, Vol. 93, 1993, 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*, Vol. 70, 1990, 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*, Vol. 105, 1996, pp. 414-427.

[7] Kalghatgi, G. T., "Blowout stability of gaseous jet diffusion flames. Part II: Effect of cross wind," *Combustion Science and Technology*, Vol. 26, 1981, pp. 241-244.