

# 로브형 버너에서의 NOx 배출특성

조한창\* · 조길원\* · 이용국\*

## Characteristics of NOx emission in lobed burner

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

**Key Words :** Lobed burner, NOx emission, and flame visualization

### Abstract

Using lobed burner, flame visualization and measurements of NOx and CO concentration in the combustor exit were carried out to evaluate the relation between the lobed structure in a burner and pollutant emission characteristics. The flame stability is enhanced by the lobed burner compared to conventional circular one. The correlation on fuel discharge velocity for flame blowout should be included on a variable related to the wall effect of the burner, because the flame blowout is observed at the burner having large perimeter. The burner having lobed structure in fuel discharge side compared to conventional burner reduces by 5% NOx emission due to lower flame intensity through flame elongation. Meanwhile the burner having lobed structure in air discharge side and both fuel and air discharge side increase the NOx emission.

### 1. 서 론

최근 환경오염문제가 사회관심사가 되면서 엄격해지고 있는 공해물질과 온실가스배출 규제에 대응할 수 있는 저공해 고효율 연소기의 개발필요성이 증대되고 있다. 연소기의 연소성능과 공해물질 배출특성은 버너부근의 혼합특성에 따른 화염거동과 노내 최고온도에 의해 지배된다. 이에 따라 버너관련 연구들이 많이 진행되어 왔다. 고속분사를 이용한 부상화염<sup>(1)</sup>이 최근 NOx 저감기술로 응용되고 있지만, 이것 이외에 최근 주목받고 있는 저 NOx

버너개설로는 원형 버너대신 축방향의 로브(lobe)구조, 예를 들면 버너출구에 삼각형 모양의 탭(tap)을 설치하거나 굴곡가공하여 원주방향의 구조를 갖는 버너를 이용한 연구가 소개되고 있다. 유체역학자들<sup>(2)</sup>은 로브구조 버너에서 강한 축방향 와도(streamwise vorticity)로 3 차원의 원주방향 와(azimuthal vortex)가 발생하여 일반 원형버너에 비하여 혼합이 촉진된다고 밝히고 있다. 최근에는 Mitchell<sup>(3)</sup>등이 2 차원 슬릿 slit)형 로브구조 버너를 이용하여 CO, NOx 등의 공해물질 배출특성과 화염안정성에 대한 기초적 연구를 수행하였다. 그에 따르면 등간격의 슬릿형 노즐에 비해 로브구조의 슬릿노즐에서 혼합이 촉진되었으며,

\* 포항산업과학연구원

보다 연료희박 조건에서도 연소가 가능하였다. 상류에서 높은 스트레인률(strain rate)에 의해 휘염의 화염선단이 하류로 밀리면서 부분 예혼합성(partial premixedness)이 증대되어 청염부위가 보다 넓게 발생하였다고 보고하고 있다. 하지만 혼합증대에 따라 화염선단에서 수트발생이 억제되면서 복사열손실량이 감소되면서 화염온도가 상승되고 NOx 증가도 우려된다고 밝히고 있다.<sup>(4),(5)</sup> 이에 따라 부분 예혼합성의 향상이 항상 바람직한 것은 아니며, NOx 저감에 유리한 조건이 있을 것이라 생각하였다.<sup>(4),(6)</sup> 즉 화염선단이 부분 예혼합성의 연료과잉 구간 또는 연료희박 구간에 존재하는지에 따라 NOx 배출 특성이 결정될 것이다. 그러므로 로브구조와 유동조건에 따른 NOx 배출 자료의 축적을 통해 로브구조와 NOx 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 온도등을 채택하였다. 로브구조에 따른 공해물질 배출특성으로부터 공해물질의 배출저감 정도와 저 NOx 버너기술로의 사용가능성을 판단하고자 한다. 이를 근거로 공해물질저감을 위한 최적의 로브형 버너형태를 제시하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

로브형 버너를 갖는 원형 연소기는 Fig.1 과 같이 연료와 산화제를 정량으로 공급하는 유로계(flow system), 점화기, 그리고 연소기등으로 구성되어 있다. LPG 는 볼 밸브, 정압계(regulator)와 니이들 밸브를 차례로 거치면서 유량이 정량으로 조절된 다음 연소기로 공급된다.

공기는 송풍기, 볼밸브, 정압계, 유량계, 니이들 밸브, 예열기를 거쳐 연료와의 동축관을 통해 연소기로 공급된다. 여기서 전기 예열기는 공기를 500°C 까지 예열할 수 있으며, 송풍기로부터의 유량변동을 최소화하기 위하여 사용되는 공기유량이 최소 20 초이상 체류하도록 제작하였다. 화염의 초기 점화에만 이용되는 점화기는 버너출구면에 10mm 의 구멍을 내서 부착하였다. 실험에서 점화기가 부착된 위치의 수트라인(soot line)이 약간 상류에 위치하는 등 유동교란이 약간 있었다. 화염가시화를 통해 화염 모습과 거동을 파악하기 위해 연소기는 길이 1200mm, 직경 144mm 의 투명한 석영관으로 구성하였다.

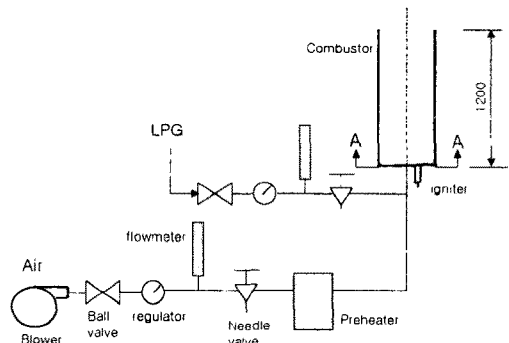


Fig. 1 Schematic diagram of lobed combustor

Fig.2 는 상세한 연소기 모양과 여러 버너의 단면도를 도시한 것이다. 연료는 내경 4mm 관을 통해 공급되고 공기는 내경 36.5mm 의 동축관을 통해 분사된다. 실험에는 내경 4mm, 두께 3mm 인 4 종류의 연료버너가 사용되었다. Type 1 은 일반적인 원형버너이다. Type 2 는 연료가 분사되는 외벽에 4 개의 로브가 존재하고 공기가 분사되는 외벽은 원형으로 되어 있다. Type 3 는 반대로 연료분사구의 외벽이 원형, 공기분사구의 내벽에

4 개의 로브가 있다. Type 4 는 연료 분사구의 외벽과 공기 분사구의 내벽에 모두 4 개씩의 로브가 있다.

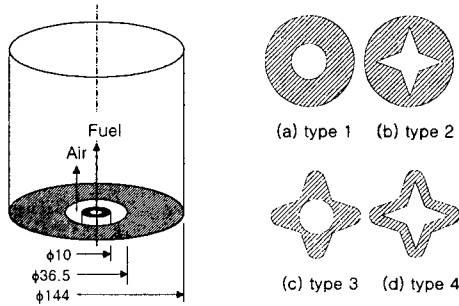


Fig.2 Burner shape and type with lobed structure

연소기내 화염거동을 알아보기 위해 Kodak 카메라를 이용하여 셔터속도 1/60, 노출 3.5 로 화염의 직접사진을 얻었다. 각 버너별 공해물질 배출특성을 파악하기 위해 버너출구로부터 100cm 하류에 프루브를 삽입하여 가스를 포집하고 NOx 분석기 (Madur model)를 이용하여 CO 와 NOx 를 측정하였다. NOx 분석기에서 데이터가 완전히 안정화된 후에 그 결과를 읽고 여러 번의 시도를 통해 그 오차를 5%이내로 최소화하였다.

### 3. 결과 및 고찰

안정된 화염을 얻을 수 있는 연료와 공기의 유속구간을 확인해 보았다. Fig.3 은 연료유속을 일정하게 놓고 공기유속을 증가시켜 얻은 화염안정화 선도이다. 도시된 지점의 왼쪽영역이 안정된 부착화염 영역이고 오른쪽영역이 화염날림 구간이다. 본 연구에서 화염날림은 화염이 부착이나 부상된 상태로 5 분이상 지속되지 못하고 소멸된 경우로 정의하였다. 본 유동장에서는 비교적 약한 교란에도

부상화염이 소멸되어 부상화염구간을 얻을 수 없었다.

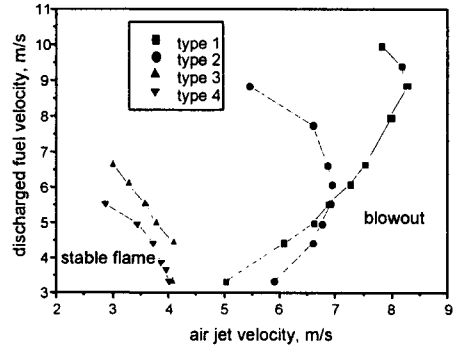


Fig.3 Flame stability diagram in confined flow field

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, 2 는 하나의 공기유속에 대하여 두 개의 화염날림 구간이 존재하는 반타원형의 안정화 선도를 보이지만, type 3, 4 는 선형적인 화염날림구간을 갖고 있었다. 그리고 type 1 은 2 에 비해 저속에서도 화염날림이 발생하기는 하지만 보다 큰 반원의 안정화 선도를 갖고 있었다.

화염안정화 선도는 로브형태에 따라 큰 차이가 있었는데 그중에서 type 1 과 2 버너에서 type 3 과 4 버너와 완전히 다른 경향이였다. 이는 노즐 립이 화염안정기의 역할을 하기 때문이다. 즉 노즐 립의 면적이 넓은 type 1, 2, 3, 4 의 순서로 넓은 유속조건에서도 화염이 안정화되었다. 만약 type 3 과 4 의 노즐 립 면적을 증가시키면 보다 넓은 영역에서 화염이 안정화될 것으로 판단된다.

화염안정화 선도를 기준으로 평가해 본다면, 혼합은 type 1, 2, 3, 4 의 순으로 빠르게 이루어진다는 것을 알 수 있었다. 혼합이 증대되면 화염의

안정성이 향상되는데, 이것은 연료과잉 구간에서 양론조건으로 가는 영역에 화염이 존재하는 경우에 해당된다. 만약 화염선단이 연료과잉 조건에 있다면 혼합이 증대될수록 화염은 보다 안정적으로 이루어져야 한다. 그러나 본 연구에서는 오히려 화염 불안정성이 증대되었기 때문에 간접적으로 화염이 연료과잉 조건에 존재하지 않는다는 것을 알 수 있다. 그러면 본 연구에서 얻어진 화염은 어디에 위치하는가? 아마도 연료희박 조건에 주로 존재하는 것이 아닌가 판단된다. 왜냐하면 만약 혼합이 매우 빨리 양론조건 위치에서 임계 스칼라 소산률<sup>(7)</sup>보다 큰 스칼라 소산률이 얻어진다면 화염은 하류로 밀리면서 연료희박조건 위치에서 존재할 수 있다. 연료희박 위치에 화염이 존재하면 연소반응에 의해 방출될 수 있는 열량도 감소하게 된다. 즉 화염온도가 낮아지면서 외부교란에 대한 대응력 약화와 그에 따른 화염의 소멸 가능성 증대를 의미한다.

화염날림의 연료유속<sup>(8)</sup>은 연료분사 직경, 최대 총류 연소속도, 연료/공기의 밀도비, 연료의 동점성계수, 그리고 양론비에서 연료의 질량분율에 의해 결정된다. 본 연구에서 사용된 연료분사구의 면적은 동일하다. 이를 원형으로 환산하면, 연료노즐 직경은 동일하게 되나 화염안정화 선도는 큰 차이가 발생하였다. 그러면 무엇에 의해 화염날림이 발생하는 연료분사 속도의 차이가 발생하는가? 버너출구의 로브구조는 유동의 벽면효과를 증대시키기 때문에 노즐 중심부의 유속은 원형노즐에 비해 월등히 증가된다. 이에 따라 반경방향에 큰 속도구배가 생기고 원주방향 와도가 강하게 발생하면서 혼합효과가 증대되면서 화염날림특성이 변화된다. 그러므로 화염날림을 위한 연료유속의 결정에 벽면효과가 고려된 새로운 변수가

도입되어야 한다.

여러 로브형 버너를 이용하였을 때 CO와 NOx 배출량을 계측하였다. 이때 사용된 변수는 당량비, 연료유량, 그리고 공기온도 등이었다. 당량비는 공기과잉조건에서 연료유량이 결정되면 그에 맞게 공기유량을 결정하였다. 공기온도는 상온과 500°C로 예열된 두 가지 조건을 채택하여 사용하였다.

20°C의 상온 공기를 산화제로 사용하였을 때의 NOx 배출량을 Fig.4에 도시하였다. 연료유속은 3.32m/s와 4.42m/s 등의 두 조건을 채택하였다. 얻어진 NOx의 대부분은 NO였으며 NO<sub>2</sub>는 거의 검출되지 않았다. 또한 전체적으로 발생하는 NOx 양은 매우 적었다. 적은 연료유량이 사용되어 화염세기가 매우 낮기 때문에 NOx가 적게 검출된다.

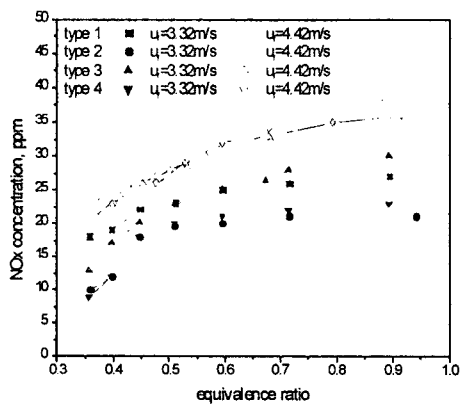


Fig.4 NOx emission concentration with air of 20°C

당량비를 0.4에서 1.0 부근까지 증가시켰을 때 NOx는 다소 증가하였다. 이것은 기존 연구자들의 결과와 동일한 경향이지만 급격한 농도구배는 없었다. 연료유속을 3.32m/s에서 4.42m/s로 증가시켰을 때 NO의 양은 약간 증가되었다. 이는 연료유량증가에 따라 보다 많은 열량이 공급되면서

연소기내 온도가 상승되어 활성화된 Zeldovich 반응기구에 의한 NOx 증가라 판단된다. 이때 NOx 는 버너형태에 거의 무관하게 배출되었다. 3.32m/s 의 연료 유속에서는 type 2, 4 의 버너가 type 1, 3 의 버너에 비해 약간 적은 NOx 가 배출되었다. 그러나 4.42m/s 인 경우에는 차이가 거의 없었다. NOx 배출량이 버너형태에 거의 무관한데 이는 아마도 생성되는 양이 매우 적고 화염세기가 미약하기 때문이다.

500°C 로 예열된 공기를 사용하였을 때 버너형태에 따른 NOx, CO 배출량을 Fig.5 와 Fig.6 에서 비교하였다. 이때 유량조건은 연료유속이 5.53m/s 와 11.1m/s 인 경우로 한정하여 당량비에 따른 결과를 도출해 보았다. Fig.5 의 NOx 배출량에서 저온의 결과와 마찬가지로 연료량 증가에 따라 NOx 발생량이 증가하였다. 이때 0.5 이하의 당량비에서는 그 증가량이 매우 미미하였지만, 당량비가 증가함에 따라 그 증가량은 더욱 증대되었다. 이는 당량비 증가에 따라 상승된 화염온도에 의한 것이다. 당량비를 0.3 에서 1.0 까지 증가시켰을 때, 연료유량이 많은 경우와 적은 경우에 따라 NOx 의 발생 경향이 다른 것을 볼 수 있다. 즉 연료유량이 적은 경우에는 당량비증가에 따라 NOx 가 증가하지만, 5.53m/s 이상에서는 당량비 0.3 과 1.0 사이에서 가장 많은 NOx 를 배출되었다. 연료유속 5.53m/s 에서는 대략 0.8 부근, 그리고 11.1m/s 에서는 0.7 부근에서 가장 많은 NOx 가 배출되었다. 본 연구에서의 NOx 배출 경향이 평형상태에서의 경향과 차이가 있는데, 이는 본 연구가 평형상태에서 측정된 것이 아니기 때문이다. 그러나 비교적 긴 체류시간을 갖는 저속 유동장에서는 당량비 1.0 부근에서 최대값을 나타내는 등 평형상태에서의 NOx 배출특성과 비슷한 경향을 보이는

것을 알 수 있다.

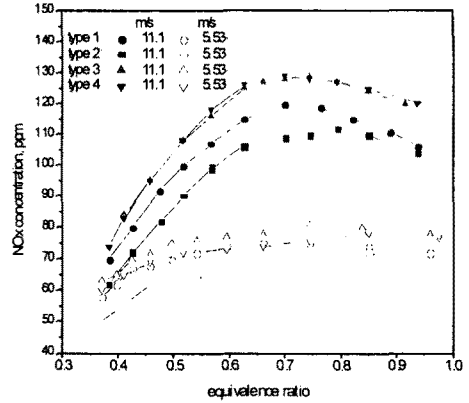


Fig. 5 NOx emission concentration with air of 500°C

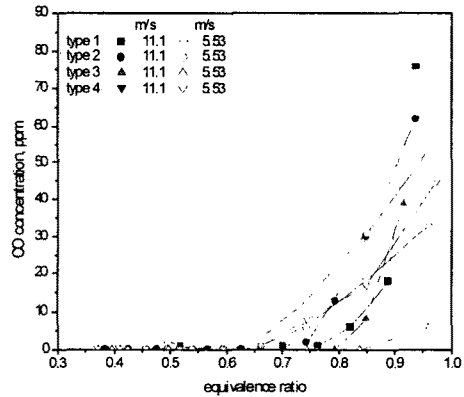


Fig. 6 CO emission concentration with air of 500°C

연료유속이 5.53m/s 일 때, 다른 버너형태에 비해 type 2 버너에서 가장 적은 양의 NOx 가 발생하였으며, type 1, 4, 3 의 버너로 가면서 점차 많은 양이 발생하였다. 연료유속 11.1m/s 의 경우에서도 위와 동일한 순서로 NOx 가 배출되었는데, 연소부하가 클 때 버너형태의 영향이 더욱 증대됨을 알 수 있었다. type 2 버너에서 type 1 의 원형 버너에 비해 약 5%정도 적은 NOx 가 배출되었으나, type 3 과 4 의

버너에서는 오히려 많이 배출되었다.

Fig.6 의 CO 배출결과를 보면, CO 는 양론조건부근에서 가장 많이 생성되고 당량비가 낮아지면서 거의 생성되지 않았다. CO 는 불완전 연소과정에서 발생한다. 즉 양론조건 이상에서는 물론이고 그 이하에서도 적절한 혼합과 체류시간을 만족시키지 못했을 때에는 결국 불완전 연소가 이루어지게 된다. 특히 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/s 에서 가장 많은 일산화탄소가 발생하는 것이 특이하다.

Fig.6 에서 CO 는 당량비 1.0 부근에서 다량 배출되지만, 그 이하에서는 급격히 감소되면서 거의 소멸되었다. CO 배출량은 연소부하와 버너형태 등의 변수에 일정한 경향을 보이지는 않았다.



Fig.7 Direct photographs of flame with air of 500°C

Fig.7 은 각 버너에서 연료유속이 11.1m/s, 당량비 0.46, 공기를 500°C 로 예열하였을 때의 화염사진이다. Type 3, 4 와 달리 type 1, 2 의 버너를 이용하였을 때의 화염인 Fig.7(a),

(b)에서 버너출구에 부착된 휘염을 볼 수 있는데, 이는 노즐 립에 비교적 큰 재순환영역이 생성되면서 휘염이 존립 가능한 체류시간을 제공하기 때문이다. Fig.7(c), (d)는 노즐 립의 면적이 작아지면서 재순환영역이 좁아지고 이에 따라 휘염이 관찰되지 않는다.

Fig.7 에서 화염길이를 측정하여 보면, type 1 은 310mm, type 2 는 360mm, type 3 는 355mm, type 4 는 349mm 등이었다. Type 1 에서는 청염구간과 휘염구간이 모두 짧았다. 이에 반해 type 2, 3, 4 의 화염에서 버너출구에 가늘고 긴 청염이 존재하고 긴 화염길이를 얻을 수 있었다. 특히 type 2 의 버너에서는 가장 긴 화염을 얻을 수 있었다. 가시화된 사진의 화염체적에서 모든 연료가 소모된다. 이를 근거로 하면 화염의 체적이 가장 큰 type 2 의 버너에서 가장 낮은 화염세기를 얻을 수 있을 것이다. type 3, 4 의 화염이 type 1 의 화염보다 길어졌지만 상대적으로 긴 청염이 존재하기 때문에 전체적인 화염세기는 오히려 증가될 수 있다. 버너에 생성된 로브구조에 의해 청염이 길어진다는 Mitchell 등의 결과처럼 본 연구에서도 로브구조가 있는 type 2, 3, 4 에서 type 1 에 비해 청염길이가 증대됨을 확인할 수 있었다.

화염길기와 화염세기의 결과로부터 버너형태와 NOx 배출특성의 상관관계를 유추할 수 있다. type 2 에서는 화염이 길어지면서 화염세기가 약해지고 이에 따라 NOx 가 저감된다. type 1, 3, 4 에서는 화염이 단열화되면서 화염세기가 증가된다. 이에 따라 NOx 발생량이 증가된다.

상온의 공기를 500°C 로 예열하여 공급하면, NOx 배출량이 급격히 증대되었다. 공기를 예열하여 공급하는 것은 공기예열을 위한 현열이 연소기내로 추가로 공급되는 것이기

때문에 전체적인 화염온도상승으로 NOx 배출량이 증가되는 것이다.

일반적으로 연료와 공기의 혼합 특성에 따라 NOx 배출량이 결정된다고 알려져 있다. 탄화수소계 연료의 반응식에서 연료변동을 추종하기 위해서는 수십 배의 공기가 동시에 변동되어야 양론조건을 만족시킬 수 있다. 즉 혼합과정에서는 연료변동이 공기변동에 비해 월등히 강한 지배력을 갖고 있기 때문에 강한 연료변동만으로 혼합을 증진시킬 수 있다. 그러므로 연료분사구 벽면을 로브형으로 제작한 경우에서 공해물질 배출량이 저감될 수 있다. 그러나 공기분사구 벽면만이 로브형으로 된 경우에는 원주방향 와가 혼합에 미치는 영향이 상대적으로 적기 때문에 화염구조와 NOx 발생량에 미치는 영향이 거의 없다. 또한 연료와 공기의 분사구 벽면이 모두 로브형으로 된 경우에는 오히려 많은 공해물질을 배출되었는데, 이는 연료와 산화제의 분사구 출구에서 발생하는 원주방향 와가 서로 충돌하면서 과도한 혼합이 화염선단이 청염화되면서 화염온도가 상승되기 때문이라 판단된다.

본 연구의 결과를 기존연구자들의 결과를 이용하여 설명하면, type 2, 3, 4 버너의 화염선단에서 type 1 의 화염선단에 비해 청염부의 길이가 증가하였다. 이로부터 본 연구의 type 2 버너를 이용하였을 때의 화염선단이 연료과잉 조건에서 희박조건으로 가는 가장 적당한 부분 예혼합성 특성을 갖고 있기 때문에 NOx 저감이 가능하지만, type 3, 4 버너에서는 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 측정

후에 정의할 수 있기 때문이다.

본 연구에서는 로브구조로 단지 4 개의 빨이 있는 것을 채택하여 사용하였기 때문에 몇 개의 로브가 있는 것이 최적의 버너인지 확인할 수 없다. 최적의 로브형 버너는 부분에 혼합성특성에 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, 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 관찰되었다.
- (3) 로브형 버너를 저 NOx 버너기술로 응용가능할 것으로 판단된다. 연료 분사구만이 로브구조로 된 경우가 기존 원형버너에 비해 약 5%정도 저감된 NOx 를 배출시켰다. 이것은 화염이 장염화되면서 화염의 세기가 저하되었기 때문이다. 그러나 공기 분사구만 로브형으로 된 버너, 또는 연료와 공기의 분사구가 모두 로브형으로 된 버너에서는 NOx 가 다소 증가하였다. 이것은 화염이 전체적으로 약간 길어지나 이는 청염구간의 장염화에 의한 것으로 전체적인 화염 세기가 증가되기 때문이다.

- (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., *Combustion and Flame*, 1993, vol.93, pp.255
- (5) Starner, S. H., Bilger, R. W., Dibble, R. W., and Barlow, R. S., *Combustion Science and Technology*, 1990, vol.70, pp.111-133
- (6) Gore, J. P. and Zhan, N. J., *Combustion and Flame*, 1996, vol. 105, pp.414-427
- (7) Peters, N., and Gottgens, J., *Combustion and Flame*, 1990, Vol. 85, pp.206
- (8) 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-