

# 후연소기에 형성된 난류확산화염에서의 NO<sub>x</sub>생성에 관한 연구

이우섭\* · 김규성\* · 김태한\*\* · 이도형\*\*\*  
(99년 3월 15일 접수)

## A Study on the NO<sub>x</sub> Emission of the Turbulent Diffusion Flame Formed behind the After Burner

W. S. Lee\* · K. S. Kim\* · T. H. Kim\*\* · D. H. Lee\*\*\*

**Key Words :** NO<sub>x</sub>(질소산화물), PDF(확률밀도함수), Ion Current (이온전류), Emission Gas(배기가스), After Burner(후연소기)

### Abstract

The purpose of this study is to investigate the NO<sub>x</sub> emission of turbulent diffusion flame formed in the after burner, which is located on the waste gas coming out from the test furnace. Three types of flame was tested and each of which was changed by adequate equivalence ratio. It is necessary to study more about NO<sub>x</sub> reduction effect in the after burner system.

### 1. 서 론

최근 각종 산업로의 고효율화를 위해 고부하 연소가 요구되는데 이 때 배출되는 배기가스는 불완전 연소생성물 외에도 NO<sub>x</sub>와 다이옥신 등 다양한 대기 오염물질을 포함하고 있어, 이들을 감소시키기 위한 노력이 시급하다. 연소기술개선에 의한 NO<sub>x</sub>의 생성을 억제하는 방법으로는 배기가스 재순환을 이용하여 NO<sub>x</sub>를 제거하는 방법 등<sup>1)</sup>이 있으나, 무엇보다도 주어진 연소기내에서의 연소상

황을 상세히 조사한 후 이들 배출물의 생성기구를 정확히 파악하여 그 저감대책을 제시하는 것이 중요하다.

최근 실용연소기에 가장 많이 이용되고 있는 연소형태인 난류확산화염에서는 난류유동에 의한 혼합과 연소반응이 서로 간섭하여 이루어지며, 이 두 현상 간에 상호작용이 화염구조 및 오염물질 생성에 중요한 역할을 한다. 또한 최근에는 연돌 부근에 후연소실을 설치하여 불완전연소에 의한 오염물질을 제거하고자 하는 노력이 진행되어, 특히 소

\* 부경대 대학원 기계공학과

\*\* 동의공업대 자동차과

\*\*\* 정회원, 부경대학교 기계·자동차공학부

각로에서는 후연소실(2차연소실)에 공기제트와 연료를 주입하여 강한 난류에 의해 완전연소를 유도하고자 하는 노력은 일반화되어 있다. 따라서 후연소실에서 완전연소를 피하기 위해서는 이 배기가스량의 대소에 대응하여 폭넓은 유속범위에서 화염을 안정화 시키는 것이 필수적이다.

본 연구자들은 시험가열로에서 배출되는 배기가스류에 중앙분공형 보염기를 설치하여 화염의 안정범위를 넓히고 보염기에 의해 형성된 확산화염의 구조를 밝히기 위해 임의의 당량비 범위에서 안정되는 세 타입의 화염구조를 임의의 반경방향으로 조사한 바가 있고<sup>2)</sup>, 온도 및 이온전류를 측정하여 당량비 변화에 따른 중앙분공형 보염기에서의 안정화영역과 화염기구를 조사한 바가 있다<sup>3)</sup>. 따라서 본 연구에서는 앞의 연구에 이어 보염기 이후의 배출물 중에서 특히 NO<sub>x</sub>의 농도를 조사하여 온도분포, 이온전류 등과 배출물과의 관계 등을 규명하고 저감대책을 논의하는 것을 목적으로 하였다.

## 2. 실험 및 방법

### 2.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치를 Fig. 1에 나타내었다. 시험가열로에 주입되는 연료는 상용 LPG로, 조절밸브와 유량계(DC-2:PF 3/4, SINAGAWA)를 거쳐 들어가고, 공기는 루츠블로워(5HP, 4P)에서 서지탱크를 통하여 압력맥동을 최소화하여 시험가열로로 공급된다. 이때 공기의 유량은 총류유량계에 의해 검증된 오리피스 수두를 조절밸브로 조절하여 공급한다. 한편, 시험가열로에서 배출되는 배기가스의 연돌부근에 후연소기를 설치하고, 이때 공급되는 공기가 축방향으로 균일한 속도분포를 갖도록 하기 위하여 내경 25mm의 강관 8개를 설치하였으며, 이 공기는 시험가열로에서의 배기가스와 혼합을 촉진시키기 위하여 설치한 정류망(100mesh×2)과 직경 8.7mm의 강구(200개)를 거쳐 정류된다. 한편, 후연소기에 설치된 보염기는 외경 55mm, 내경 25mm의 정삼각형 단면을 갖도록 제작하였으며, 연료노즐은 주류방향에 대하여 45°로 직경 1mm, 8개의 구멍을 통하여 연료가 분출되도록 하였다.

실험에 있어서 NO<sub>x</sub>의 측정은 화학발광식 NO<sub>x</sub> 분석계(SHIMADZU NOA-7000)를 사용해 측정하였다.

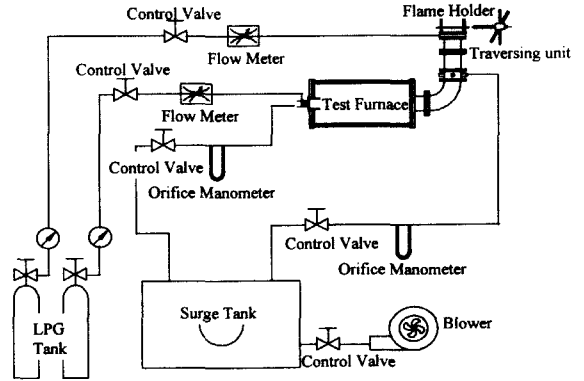


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

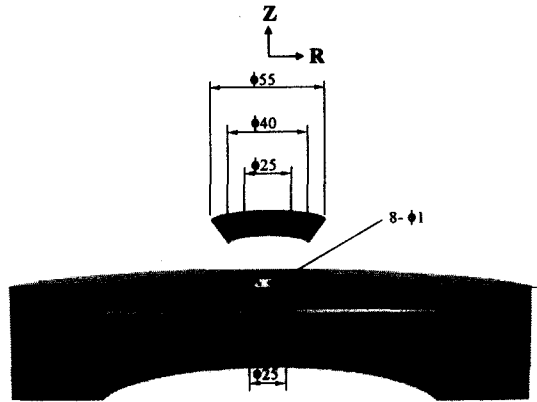


Fig. 2 Details of after burner

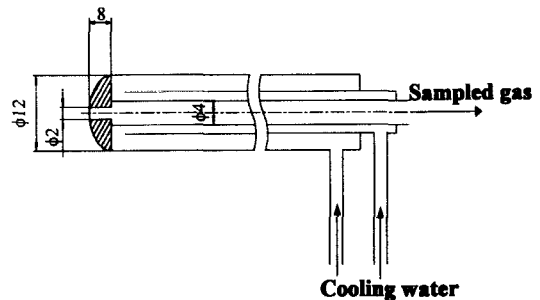


Fig. 3 Gas sampling probe

Fig. 2는 연료노즐 위에 보염기를 설치한 후연소기의 상세도이다. 이 그림에서 나타내었듯이 본 실험에서는 노즐 위에 놓인 보염기의 중심을 기준으로, 반경방향 R=0 에서 60mm 까지, 그리고 보염기 위쪽으로 Z=40에서 200mm까지 측정하였다.

Fig. 3은 농도측정 프로브를 나타낸 것이다. 흡입부가 2mm인 3중관의 수냉식으로 제작하여 3축이송대 위에 장착하여 화염의 각 방향으로 측정하였으며, 필터를 거쳐 NOx 분석기로 흐르도록 하였다.

실험조건으로는 후연소실에 공급되는 연료와 공기의 양의 변화에 의해 형성된 화염의 구조에 따라 배출물을 살피는 것이 본 연구의 목적이므로, 시험가열로에서 배출되는 배기가스의 조건을 일정하게 해두고, Table 1의 당량비 변화에 의해서 형성되는 세 가지 형태의 화염에 관하여 고찰하였다.

Table 1 Experimental conditions

(단위 :  $10^{-3} \text{m}^3/\text{s}$ )

	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	$\phi$	T(K)
Bud flame	0.311	0.08	16.22	49.27	0.18	902
Lotus flame	0.311	0.137	16.22	49.27	0.2	902
Envelope flame	0.311	0.226	16.22	49.27	0.25	902

단, Table 1에서의 당량비( $\phi$ )는 시험가열로와 후연소실에 공급되는 총연료와 공기의 비로 계산한 값이다. 이때, 시험가열로에서 배출되는 평균배기가스의 조건은 온도는 902K, O<sub>2</sub>농도는 7.8%이다. 또한 F<sub>1</sub>은 1차측 연료유량, F<sub>2</sub>는 2차측 연료유량, Q<sub>1</sub>은 1차측 공기유량, 그리고 Q<sub>2</sub>는 2차측 공기유량이다.

### 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 4는 Table 1에 나타낸 실험조건에서 형성된 세가지 화염의 직접사진을 나타낸 것이고, Fig. 5는 이들 화염의 임의 R-Z 단면에서의 평균온도 분포를 나타낸 것이다. 이들은 전체적으로 각 화염 형상에 대응하는 분포를 잘 나타내고 있다. 본 연구에서의 실험조건에서는 당량비  $\phi=0.18$ 에서는 화

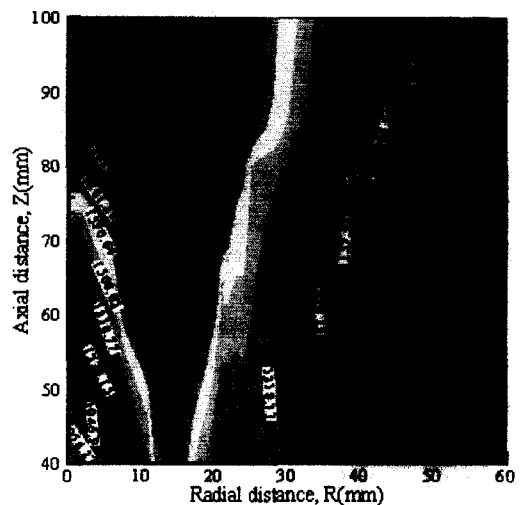
염이 보염기의 중앙분공 부근에서만 안정되는 Bud flame이 형성되며,  $\phi=0.2$ 에서는 중앙분공과 보염기의 외측에서 화염이 안정되는 Lotus flame, 그리고  $\phi=0.25$ 를 넘어서면 중앙분공에서는 화염이 나타나지않고 외측에서만 화염이 안정되는 Envelope flame으로 천이하였다.



(1) Bud (2) Lotus (3) Envelope

Fig. 4 Direct photographs of flames

Fig. 6은 시험가열로만을 연소시켰을 때 배출되는 NOx의 Z방향 단면에 대한 반경방향의 분포를 나타낸 것이다. 이는 후연소기에 연소시켰을때의 NOx 배출량(Fig. 7 참조)과 비교하기 위해 측정 한 것으로써, 대체로 보염기에서 멀어질수록 NOx 분포는 낮아지며 반경방향으로 균일한 분포를 보이고 있다.



(1) Bud



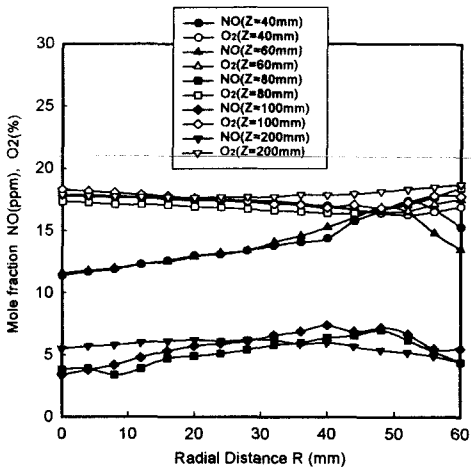


Fig. 8 Radial distributions of mole fraction of NO and O<sub>2</sub> from test furnace

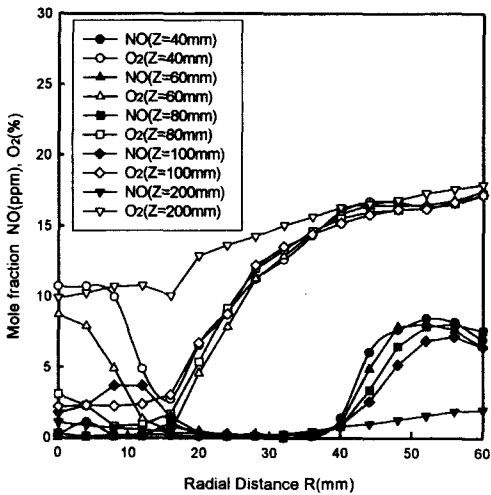
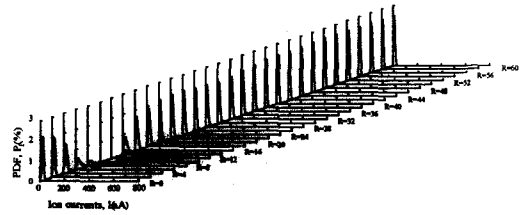


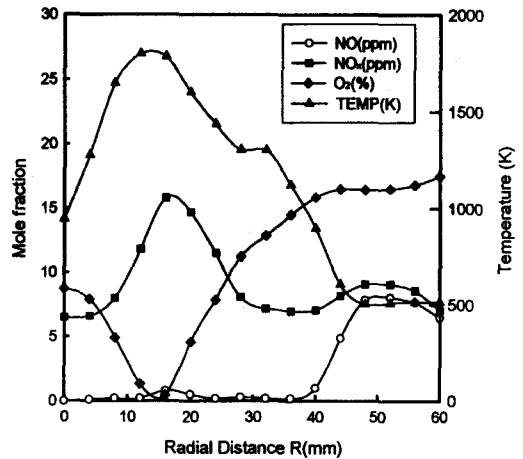
Fig. 9 Radial distributions of mole fraction of NO and O<sub>2</sub> from after burner of Bud flame

Fig. 8은 시험가열로만 연소시켰을 경우를, 그리고 Fig. 9는 시험가열로와 후연소기를 동시에 연소시켰을 경우의 NO와 O<sub>2</sub>의 분포를 각각 나타낸 것이다. Fig. 8에서는 Z=40mm와 Z=60mm 단면을 제외하고 대체적으로 균일한 분포를 보이고 있다. 한편, Fig. 9에서는 앞의 Fig. 7의 NO<sub>x</sub>분포에서 보인 것과 유사한 NO 분포를 보이고 있으며, R방향

의 위치는 차이가 있지만 온도가 높은곳에서 NO가 많고 이때 O<sub>2</sub>는 상대적으로 적은 값을 나타내고 있다. 단지 R=40mm 이후에서는, NO의 분포는 후연소기와 상관 없이 시험가열로에서의 배출량과 비슷한 값이되고, O<sub>2</sub>농도도 연소반응에 참여하지 않는 공기가 그대로 배출되므로 높은 값을 나타내고 있다. 특히, R=20~40mm 부근에서는 NO가 거의 나타나지 않고 있는 것은 흥미롭다. 이곳은 보염기 이후의 후류유동에 의해 다량의 기연가스가 존재하는 영역<sup>3)</sup>으로, 이 정도의 온도에서는 더 이상 NO 생성이 없음을 의미한다.



(a) PDFs of ion current(Z=60mm)



(b) Radial distributions of mole fraction of NO<sub>x</sub>, NO and O<sub>2</sub> of Bud flame

Fig. 10 PDFs of ion current(a) and radial distributions of mole fraction of NO<sub>x</sub>, NO and O<sub>2</sub> (b) at Z=60mm of Bud flame

한편, Fig. 10은 Bud flame의 Z방향 60mm에서의 이온전류분포(a)와 NO, O<sub>2</sub>, NOx 배출량(b)을 나타낸 것이다. 반경방향 R=8~12mm에서 많은 이온전류가 나타나는 것으로 보아 여기가 주로 활발한 반응을 하는 주반응 영역이고, 이들 주위로 고온공기류와 연료의 난류혼합 및 반응이 진행됨을 알 수 있다. 따라서 NOx 분포와 비교해 보면 주반응영역에서 화염온도가 높음에 따라 많은 NOx가 배출되는 것을 확인 할 수 있었다.

Fig. 11은 세 화염 즉, Bud, Lotus 그리고 Envelope flame의 축방향 100mm에서의 NOx와 O<sub>2</sub> 농도를 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이, Lotus flame의 경우가 다른 두 화염(Bud, Envelope flame)에 비해 NOx량이 다소 높게 나타났다. 이는 당량비가 중간 크기임에도 불구하고 보염기 이후에 반응이 활발한 고온영역이 넓기 때문이라고 생각되어진다.

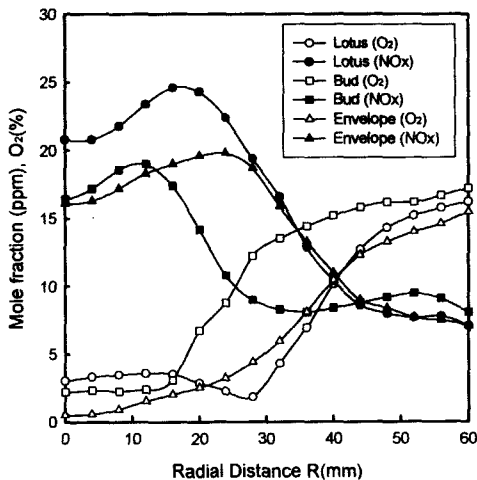


Fig. 11 Radial distributions of mole fraction of NOx and O<sub>2</sub> at Z=100mm (Bud, Lotus and Envelope flame)

#### 4. 결론

중량분공형 보염기에 의해서 안정된 세가지 형태의 화염에 대하여 배출물을 분석한 결과, 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 화염형상에 따라 구한 온도분포, 이온전류분포 및 NOx 분포를 조사하여, 이온전류가 높은 반응대를 전후하여 온도분포가 가장 높고, 여기에서 NOx가 가장 높아 있으므로 대부분의 NOx는 Thermal NOx임을 확인 할 수 있었다.

(2) 본 실험조건에서 형성된 세 화염을 비교한 결과 화염이 끝난 Z=100mm인 경우에 Lotus flame이 NOx배출이 가장 많이 나타나는 경향을 볼 수 있었다. 따라서 본 실험의 경우 당량비의 영향은 크게 나타나지 않고, 형성된 온도장에 의해 NOx배출이 좌우됨을 알 수 있었다.

(3) 온도장의 분포에서 보듯이, 보염기의 영향을 받지않는 영역(반경방향 R=40mm 이후)보다 보염기가 설치된 뒤쪽 영역의 온도는 높아 있으나, NOx는 대체적으로 낮게 나타났다. 이로써 보염기에 의한 유동장의 변화가 NOx의 배출특성에 영향을 끼친다는 사실을 알 수 있었다.

본 연구에서는 화염안정화 실험조건에 맞추어 NOx의 배출특성을 조사하였다. 그러나 보염기를 설치한 후연소실 시스템이 NOx배출을 저감시키는 효과에 관하여는 계속 연구할 필요가 있다.

#### 참고문헌

- 1) 水谷 辛夫(崔炳輪, 李度衡 共譯), “燃燒工學”, 제2版, 東明社, 1992
- 2) 강인구, 이우섭의 2명, “중량분공형 보염기 후류에 안정된 난류확산화염의 구조에 관한 연구 (I)”, 한국동력기계공학회 논문집, 제2권 제2호 pp.13~19, 1998
- 3) 이우섭, 강인구의 2명, “중량분공형 보염기후류에 안정된 난류확산화염의 구조에 관한 연구 (II)”, 대한기계학회 부산지부 춘계학술대회 논문집, pp.55~60, 1998
- 4) 최재우, 전영남의 1명, “난류확산화염에서 산소부화가 NO생성에 미치는 영향에 관한 실험적 연구”, 대한기계학회 논문집, 제14권 제4호, pp. 1022~1032, 1990

- 5) 전철균, "상호작용하의 층류 확산화염에서의 NO의 생성", 대한기계학회 논문집, 제17권 제1호, pp.190~199, 1993
- 6) Katsuki, M., "An Improved Thermocouple Technique for Measurement of Fluctuating Temperature in Flame", Combustion and Flame, Vol. 67, pp.27~36, 1987
- 7) Yoshida, A., and H. Tsuji, "Measurements of Fluctuating of Temperature and Velocity in a Turbulent Premixed Flame", 17th Symp.(Int.) on Combustion, William & Wilkins, pp.945~956, 1978