

저 NO_x 연소기술

김석준

대전 유성우체국 사서함 101호 한국기계연구원

Low NO_x Combustion Technology

Seock Joon Kim

P. O. BOX 101 Yuson, Taejon, KOREA

Korea Institute of Machinery & Materials

1. 서론

에너지의 소비가 증가해 감에 따라 화석연료의 연소가스에 의한 대기오염이 중대한 사회문제로 대두되고 있다. 연소가스 중의 오염물질로 대표적인 것은 황산화물(SO_x), 질소산화물(NO_x), 일산화탄소(CO), 미연탄화수소(HC) 등이 있다. 이 중 질소산화물은 광화학스모그의 원인으로 인체에 해를 끼칠 뿐 아니라, 산성비의 원인이 되고 식물에도 심각한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

기체상태의 질소산화물로는 N₂O, NO, N₂O₃, NO₂, N₂O₄, N₂O₅ 등 여러 가지가 있으나 연소가스에 의한 생성량이 많아 대기오염의 주범이 되는 것은 NO와 NO₂이다. 따라서 대기오염물질로서 질소산화물이라 함은 NO와 NO₂를 뜻하며 통상 두 성분을 합하여 NO_x로 표기한다.

연소가스 중의 분진이나 황산화물은 연소기의 후방에 집진기나 세정기를 설치하여 배기가스를 처리함으로써 오염물질의 농도를 줄이는 후처리 방법에 의존하고 있다.

그러나, NO_x의 경우는 선택적, 또는 비선택적 촉매환원법 (SCR, SNCR) 등에 의한 후처리 방법에 의한 배출제어에 대하여도 많은 연구를 시도하고 있으나, 연소과정을 제어하여 생성을 직접 억제하는 것이

보다 효과적인 것으로 알려져 있다.

따라서 저 NO_x 연소에 대하여 수많은 연구가 진행되고 있으며 최근 관심이 고조되는 우리나라 청정기술 분야의 중요한 위치를 차지할 것으로 기대되고 있다.

2. NO_x에 의한 공해

대기오염이 심한 대도시에서 맑은 날 나타나 광범위한 지역에 걸쳐 가시거리를 단축시키고 호흡기 질환을 유발하는 스모그는 NO_x가 주된 원인으로 알려져 있다.

연소과정에서는 주로 NO가 생성되고 NO₂로 변하는 일부를 제외하고는 그대로 대기로 배출되어 대기 중의 산소와 반응하여 NO₂로 변화한다. 태양으로부터의 광에너지에 의해 NO₂는 NO와 O로 분해되는 광화학 반응을 거친다. 이 때 생성된 O는 대기중의 O₂와 반응하여 오존(O₃)을 생성한다. 이론적으로는 오존과 반응하여 NO는 다시 NO₂로 산화되는 광분해순환(Photolytic Cycle)을 형성하지만 대기에 존재하는 탄화수소에 의해 복잡한 반응을 거치면서 다량의 오존은 물론 PAN (Peroxyacetyl-nitrate)과 같은 산화제가 생성되어 광화학 스모그 현상이 나타나게 된다.

오존은 호흡기 질환을 야기시키고 식물에 피해를

주며 급격한 산화반응으로 물질을 부식시킨다. PAN 등의 스모그 물질은 가지거리를 단축시킴은 물론 눈과 목에 자극을 주고 심하면 통증을 일으키며 두통을 유발하기도 한다.

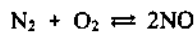
NO는 직접적인 독성이나 유해성으로 피해를 주지는 않으나 쉽게 NO₂로 산화되기 때문에 가능성이 있는 독성물질로 간주된다. NO₂는 갈색의 유독성가스로서 호흡장애를 일으키고 폐질환을 유발하며 가지광선을 흡수하여 가지도를 떨어뜨린다. 또한 식물의 성장속도를 둔화시키고 고사까지 시키는 경우도 있다. 습도가 높으면 산이 되어 부식성이 강화되고 SO_x와 함께 산성비의 원인이 된다. 이처럼 NO_x에 의한 영향은 매우 광범위하고 그 피해가 크다.

3. NO_x의 생성원리

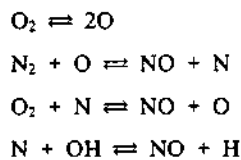
연소과정에서 생성되는 NO_x는 산소에 의한 질소의 산화에 의해 주로 NO의 형태로 생성되며 생성반응의 대상과 과정에 따라 Thermal NO_x, Prompt NO_x, Fuel NO_x의 3가지로 분류된다.

3.1 Thermal NO_x

대부분의 연소기에서 대기중의 질소의 산화에 의해 생성되는 Thermal NO_x가 지배적인 것으로 알려져 있다. 공기중의 질소와 산소를 고온의 상태로 유지하면 다음과 같이 NO의 생성이 진행되어 장시간 후에는 평형에 도달하게 된다.



그러나 위의 반응이 직접 일어나지 않고 확대 Zeldovich기구라 불리는 다음과 같은 연쇄 요소반응(Chain Element Reaction)에 의해 NO의 생성이 지배되는 것으로 알려져 있다.



Zeldovich에 따르면 연소가 종결된 후에 NO의 생성이 이루어 질 정도로 NO의 생성속도는 연소속도보다 매우 느리기 때문에 연소과정과 NO 생성과정

은 독립적인 것으로 고려될 수 있어 평형상태라는 가정으로 부터 NO의 생성율을 쉽게 구할 수가 있다. 연료가 희박한 대부분의 연소 초기조건에서는 [NO] ≪ [NO₂]. 이므로 NO의 생성속도는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{d[NO]}{dt} = c_1 T_e^{(-\frac{1}{2})} \exp(-c_2/T_e) [O_2]_e^{(\frac{1}{2})} [N_2]_e$$

이 식에 나타난 바와 같이 Thermal NO_x는 연소온도가 높고 산소의 농도가 많으며 고온연소장 내의 체류시간이 길수록 생성이 많아 됨을 알 수 있다.

3.2 Prompt NO_x

고온의 화염후류 영역에서는 NO_x의 생성에 대하여 Zeldovich기구에 따른 이론과 실험 결과가 비교적 잘 일치하고 있지만 화염면과 그 근방에서는 실험에서 측정된 NO의 농도가 평형농도보다도 훨씬 높게 나타나 Zeldovich기구와는 또다른 NO생성기구가 존재함이 예상되었다.

Fenimore는 메탄-공기, 에틸렌-공기의 예혼합 평면 화염에 대하여 실험한 결과 화염대 근처에서 급속한 NO의 생성을 발견하고 이 때의 NO를 Prompt NO라 불렀다.

탄화수소계 연료의 연소과정에서 미연탄화수소가 질소와 반응하여 CN, HCN 등의 시안화합물을 만들고 다시 이 시안화합물이 산화하여 Prompt NO가 생성되는 것으로 알려져 있다. 현재까지의 많은 연구결과 Prompt NO_x는 탄화수소계 연료에서만 생성되고 온도, 연료의 종류, 당량비 등에 대한 의존성이 비교적 낮고 특히 연료 희박화염에서는 거의 무시할 수 있으며 연소가스의 체류시간에는 전혀 무관한 것으로 판명되었다. 그러나 Prompt NO_x의 생성과 소멸과정은 아직까지 정확히 알려지지 않고 있다.

3.3 Fuel NO_x

화합물의 형태로 연료에 함유되어 있는 질소성분이 산소와 반응하여 생성되는 NO_x를 Fuel NO_x라 한다. 순수한 Fuel NO_x의 생성을 확인하기 위하여 공기와 동일한 열용량을 가지는 Ar혼합기체를 연소용 산화제로 사용한 Pershing과 Wendt는 석탄 연소시의 경우에 전체 NO생성량의 80%정도가 Fuel NO이며 넓

은 범위에 대하여 화염온도의 영향을 받지 않음을 밝혔다.

Fuel NO_x는 이론당량비나 그 이하의 연료희박 연소과정에서 연료중에 함유된 대부분의 질소성분이 연소반응과 거의 같은 속도로 전환된다. 연료과잉인 경우에는 연료중의 질소가 HCN으로 전환된 후 다른 중간생성물을 거쳐 결국은 Fuel NO_x를 생성하게 된다. 연료중의 질소함유량이 많을수록 NO_x로의 전환율은 감소하지만 전체생성량은 증가하게 된다.

Fuel NO_x는 연료를 대체하거나 산소의 분압을 저하시켜 생성을 억제할 수 있는 것으로 알려져 있다.

4. 저 NO_x 연소기술

4.1. NO_x의 생성과 연소기 설계인자

연소기에 있어서 NO_x의 생성에 영향을 주는 인자는 여러 가지가 있겠으나 연료와 공기와의 화학반응 뿐 만 아니라 버너 및 연소실내에서의 열교환, 공기역학적인 현상 등과 관련하여 연료의 성상, 연소방식, 연소실 형상 및 운전조건 등을 들 수 있다.

NO_x의 생성에 가장 큰 영향을 주는 것이 화염의 형태이므로 화염의 형태를 특징지우는 버너의 형상은 매우 중요하다. 연료의 공급 방법, 버너 출구의 기하학적 구조에 따른 연료와 공기의 속도와 혼합, 버너 타일의 형상에 따른 난류도와 온도분포 등이 그 예이다.

연소공기의 예열온도가 높을수록 Thermal NO_x를 많이 생성시키지만 예열온도를 너무 낮추게 되면 NO_x의 저감효과가 큰 반면 열효율이 감소하여 경제성이 떨어진다.

또한 과잉공기의 양이 증가하면 반응대 근처의 산소농도가 증가하므로 Thermal NO_x 및 Fuel NO_x가 증가하나 이로 인해 화염의 온도가 떨어지게 되어 Thermal NO_x는 전체적으로 감소하게 된다. 과잉공기를 이론당량비보다 작게하면 Thermal NO_x와 Fuel NO_x량을 줄일 수 있으나 불완전 연소에 의한 CO의 배출량이 증가할 우려가 있다.

연소실을 크게하면 로벽으로의 복사열전달량이 작아지므로 이를 보상하기 위하여 높은 온도로 운전하게 되면 NO_x의 생성이 증가한다. 일반적으로 부하를 높일수록 NO_x의 생성이 증가하게 되며 최대 부하에서 최대로 생성이 된다.

연료의 성상은 기술한 바와 같이 연료 중의 질소

함유량이 높을수록, 질소 화합물의 분해가 쉬울수록, 연료의 질이 낮을수록 Fuel NO_x의 생성을 촉진한다.

이와같은 인자들에 대하여 NO_x의 생성을 예측하는 방법으로는 실험식을 이용한 semi-empirical방법과 수치해석에 의한 방법이 있다. 실험식을 이용한 방법은 연료, 연소기 형상 및 운전조건 등의 주요인자의 상관관계를 단순화된 실험에 의해 구한 것으로, 기본설계 단계에서 설계자가 쉽게 적용할 수 있으나 다양한 인자에 대해 많은 데이터를 확보하기가 쉽지 않다. 반면에 수치계산에 의한 방법은 다양한 인자에 대하여 많은 정보를 신속히 얻어낼 수 있는 장점이 있으나, 연소실내 유동의 복잡성과 다단 화학반응의 취급 등을 다룰 수가 없어 아직 설계에 적용하기에는 많은 연구가 필요하다.

4.2 NO_x의 생성제어

NO_x의 발생을 근원적으로 억제하기 위한 대책은 매우 다양하지만 운전조건, 연소방법, 연료 등의 개선으로서 Table 1과 같이 분류할 수 있다. NO_x의 제어 대책에는 열효율, 시설비 및 운영비 등의 경제성과 분진이나 CO 등의 다른 대기오염물질의 농도 등을 동시에 고려하여야 한다.

주어진 연료나 연소기에 대하여 운전조건을 잘 설정하여 NO_x의 발생을 줄이는 것은 매우 중요하다. 에너지 사용량이 증가하게 되면 화석연료의 사용도 증가하여 총체적인 NO_x의 발생이 당연히 증가하게 되므로 연료소비량을 줄이는 것을 일차적인 NO_x저감책으로 생각할 수 있다.

기술한 바와 같이 연소 부하를 저하시키면 화염온도가 떨어지게 되고 NO_x 발생이 억제된다. 그러나, 저부하연소는 열효율 저하 뿐만 아니라 Fuel NO_x의 제어에는 큰효과가 없음을 고려하여야 한다.

저 공기비 연소는 에너지 절약 연소로서 널리 사용되고 있다. 산소농도를 낮추어 연료를 연소하여 반응속도가 늦은 질소의 산화 억제에 의하여 NO_x의 생성을 제어하는 것으로, Thermal NO_x 뿐만 아니라 Fuel NO_x의 제어에도 유용하다. 그러나 이론공기비 이하의 연소는 분진이나 CO의 발생을 피하기 어렵다.

저질의 연료에는 질소 화합물의 함량이 많고, 중질유는 경질유에 비하여 무화입경의 분포가 넓기 때문에 화염온도가 낮아도 Hot Spot이 생기기 쉬우므

로 NO_x가 증가되는 경우가 많다. 따라서, 양질의 연료로의 전환은 Fuel NO_x 뿐만 아니라 Thermal NO_x의 제어에도 효과를 기대할 수 있다.

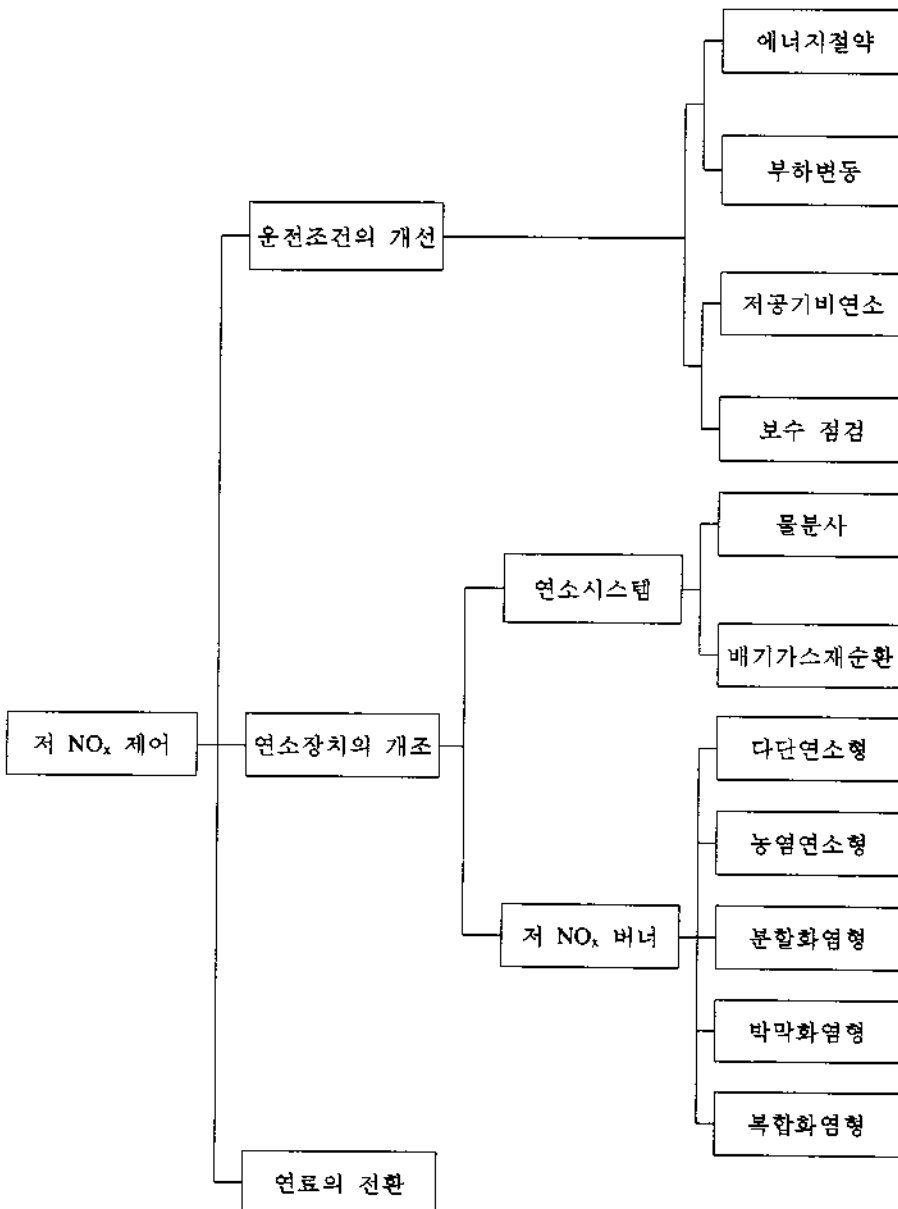
이와 같이 운전조건의 개선이나 연료의 전환으로도 NO_x의 제어가 가능하지만 연소장치를 개선하는 것이 실질적인 저 NO_x 연소기술의 핵심이 된다.

4.3 저 NO_x연소 시스템

4.3.1 배기가스 재순환 (Flue Gas Recirculation)

연소실내의 연소영역에 약 200°C정도의 배기가스를 재순환시킴으로서 연소실 내의 온도를 낮추고 연소영역의 산소농도를 희석시켜 NO_x 생성을 억제하는 방법이다.

Table 1. 저 NO_x 제어방법



따라서 다음절에서는 저 NO_x 연소시스템과 버너에 대하여 집중적으로 기술하고자 한다.

화염온도의 저감 효과가 크므로 Thermal NO_x의 저감은 물론, Fuel NO_x의 제어도 기대할 수 있다.

일반적으로 사용되는 방법으로는

1) 원드박스 또는 공기 덕트내에 배기가스를 주입하는 에 혼합 방법

2) Air Register내에 재순환 배기가스 노즐을 설치하여 배기가스를 흡입하여 연소실내에서 연소용 공기와 후혼합(After Mixing)시키는 방법이 있다.

1)의 경우는 진동연소를 일으키기 쉽고 2)의 경우는 착화불량의 경우가 많으므로 배기 가스 재순환율은 대형보일러의 경우는 20-30%, 소형보일러의 경우는 10-20%로 제한하여 사용하며 분진 등에 대한 대책도 필요하다.

4.3.2 물분사 (Water Spray)

화염속으로 물 또는 증기를 분사함으로써 물의 잠열과 현열에 의하여 화염으로부터 열을 흡수하므로서 화염온도를 낮추어 NO_x 를 제어하는 방법이다.

물을 분사하는 방법으로는

- 1) 버너 또는 그 근방의 연소화염에 물을 직접 분사한다.
- 2) 연료에 물을 혼합한 에멀전 연료를 사용한다.
- 3) 연소공기에 물을 분사하여 습공기로서 사용한다.

1)의 경우가 NO_x 저감 효과가 가장 크며, 2)의 경우는 국소 고온부(Hot spot)의 제거 및 미립화 촉진 등의 장점이 있다. 위의 어느 경우에도 물의 양은 연소 발열량 10,000kcal당 0.5kg이 한계로서, 양질의 연료쪽이 저감율이 크다.

물분사시는 다음과 같은 점을 유의하여 설계하여야 한다.

- 장기운전에 있어서의 물로 인한 침식
- 연소효율 저하
- 유류연소의 경우 저감효과 미약
- 연소소음의 증가

4.3.3. 다단연소 (Multi-stage Combustion)

다단연소라 함은 연료나 공기를 여러단계로 나누어 공급함으로써 초기의 연료과잉영역에서는 낮은 산소 농도로 NO_x 생성을 억제하면서 N_2 로의 환원을 촉진시키고, 후영역에서 공기를 충분히 공급하여 완전연소를 이루게 하는 연소방법이다. 이는 효율을 저하시키지 않는 대표적인 저 NO_x 연소기술로서 공기

와 연료를 각각 단계적으로 공급하는 방식에 따라 다시 여러 가지 연소법으로 나누어 진다.

2단연소(Two Stage Combustion)법은 연소용 공기를 2단으로 나누어 1차 연소영역에 이론 공기량의 70-100%의 공기를 공급하고 2차 연소영역에 나머지 과잉공기까지를 공급하여 완전연소를 꾀하는 방법이다. 수직형 연소로에서 1차연소영역의 상부에 2차공기를 추가로 공급한다하여 상부공기공급(Overfire Air Injection) 법이라 부르기도 한다.

이 외에도 연소로에 설치된 다수의 버너 중 일부 버너에는 연료를 과잉으로 공급하고 다른 주위의 버너에는 과잉공기 또는 공기만을 공급하는 방법, 탄화수소기의 반응에 의한 NO_x 의 환원을 유도하기 위하여 첨가제로 연료의 일부를 주 연소영역의 상부에 분사시키는 방법 등이 있다.

4.4 저 NO_x 버너

4.4.1 자기 재순환형 버너 (Self-recirculation Burner)

연료 또는 연소용 공기의 분출속도를 이용하여 버너 내부에 연소가스를 재순환시켜 연소 화염영역의 산소농도를 낮추므로서 연료의 증발 및 가스화를 촉진시켜 후류에서의 연소를 가스연소에 가깝게 한다. 이 버너는 화염 중에 Hot Spot의 발생을 방지함은 물론 산소농도가 낮은 영역이 연소 초기에 형성되기 때문에 Fuel NO_x 제어의 효과도 있다.

연소가스 자기 재순환은 고온의 가스를 재순환 시키기 때문에 연소온도를 저하시키는 효과는 적다. 따라서, 연도부근의 저온의 배기가스를 재순환시키는 배기가스 재순환에서와 같은 높은 NO_x 저감율은 기대하기 어렵다.

4.4.2 다단 연소형 버너(Distributed or Staged Mixing Burner)

가장 널리 사용되고 있는 방법으로, 연료와 공기를 급속히 혼합시켜 저공기비에 의한 고부하 균일연소를 실현하는 종래의 버너와는 달리 연소용 공기를 다단으로 공급하므로서 고온 화염영역을 고의로 피해가는 연소방식의 버너이다. 연소용 공기를 단계적으로 공급하는 방법과 연료를 단계적으로 공급하는 방법이 사용된다.

2단 연소의 경우를 예를 들면, 1단으로는 공기비를 약 0.7정도로 하여 초기 연소영역을 환원분위기로

하여 산소농도를 저하시켜 Fuel NO_x를 제어하고, 2단으로는 공기비를 1.5정도의 과잉공기를 불어 넣어 연소온도를 낮추어 Thermal NO_x를 제어한다. 이 버너는 불균일 연소 버너라고도 한다.

4.4.4 농염 연소형 버너(Off-Stoichiometric Combustion Burner)

농염(Bias)연소는 다단연소와 유사한 불균일 연소를 행하는 방법으로 비화학양론적(Off-Stoichiometric) 연소라고도 부른다.

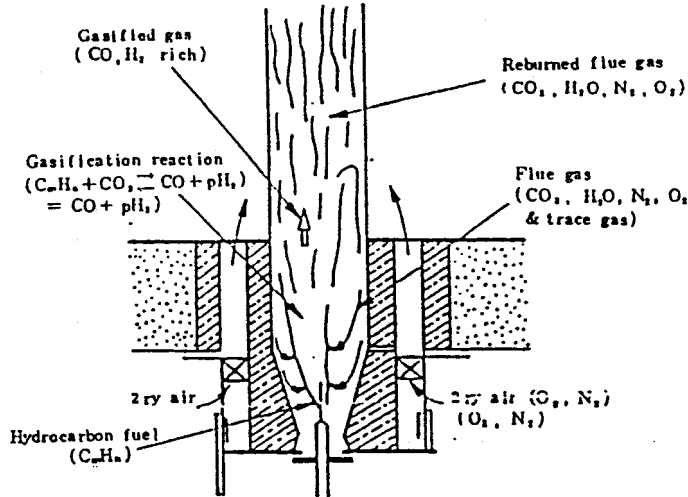


Fig. 1. Combustion concept in self-recirculation burner.

4.4.3 박막 화염형 버너(혼합 촉진형 버너, Mixing Promoted Burner)

원추 또는 벨형의 얇은 막 형태의 화염을 형성시키는 버너로서, 화염 표면적이 넓기 때문에 열방출이 촉진되어 화염온도의 상승이 억제되므로서 NO_x가 저하 된다. 또한 연료와 공기의 혼합이 빨리 이루어지도록 하여 급속하게 연소를 종결시켜 고온의 경우에도 연소가스의 체류시간이 단축되어 NO_x가 저감된다. 이와같은 혼합촉진형 버너는 화염의 길이가 짧고 고부하 연소가 가능하며 연소특성이 향상되어 분진, CO, UHC등의 미연분이 적으며 화염의 길이 및 지름이 공연비와 부하에 영향을 적게 받는 이점이 있는 반면 연소용 공기의 속도를 증가시켜야 하므로 버너 출구의 압력손실이 큰 단점도 있다. 또한, Fuel NO_x의 저감은 크게 향상되지 않는다.

연소량이 다른 여러 대의 버너에 의하여 환원염과 산화염을 차례로 만들어 Thermal NO_x를 제어하는 것으로, 저공기비 연소의 경우 균일한 표준버너에 비하여 분진이 증가하지만, 공기비 1.3이상에서는 농염연소에 의하여 NO_x를 제어하는 것이 가능하다. 이 경우 2차 연소영역에서는 연료와 공기의 혼합이 잘 이루어져 분진, CO, UHC의 발생을 억제할 수 있다.

4.4.5 분할 화염형 버너 (Spilt Flame Burner)

화염을 독립된 작은 화염으로 나누어 화염내의 가스체류시간을 단축하고 화염의 표면적 증가에 의하여 화염온도를 저하시켜 Thermal NO_x를 제어한다. 또한, 고부하 연소에서도 착화성 및 화염의 안전성이 우수하며, 농염연소 또는 자기순환 등의 연소기구와의 조합이 용이하다. NO_x저감율은 18-40% 정도이며,

Fuel NO_x 억제에는 큰효과가 없다.

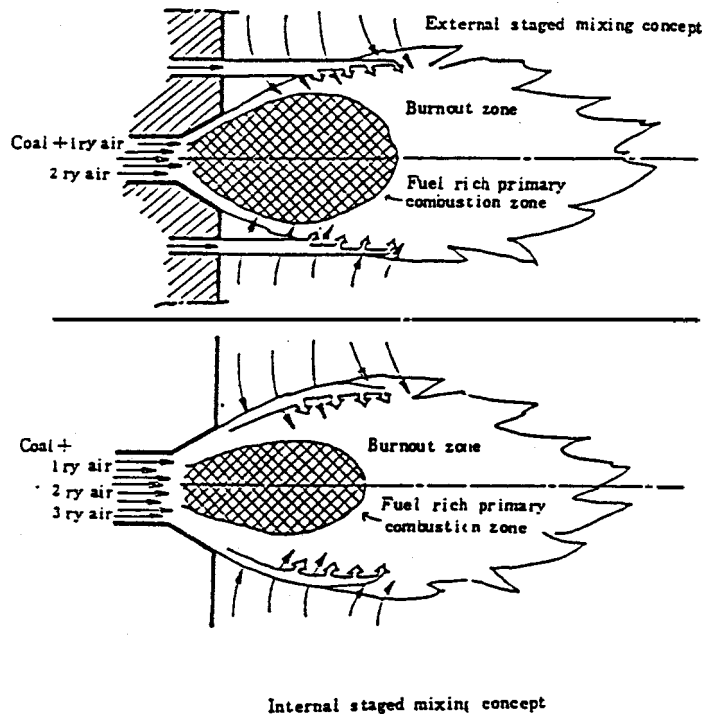


Fig. 2. NO_x control concept of staged mixing burner.

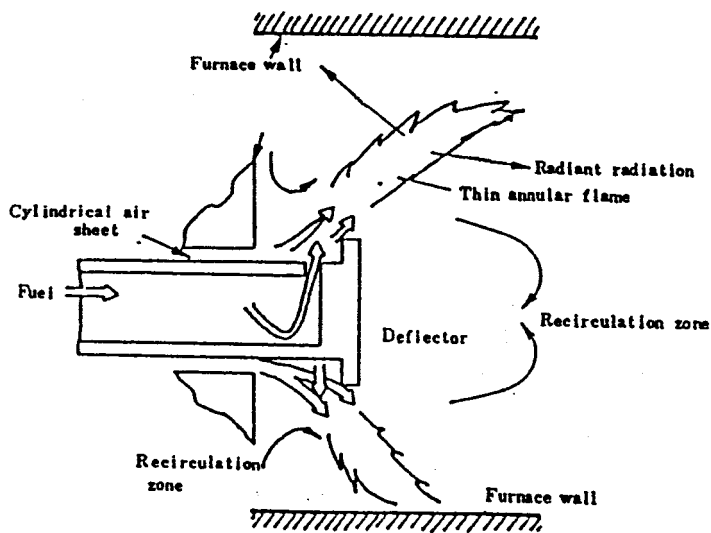


Fig. 3. NO_x control concept of mixing promoted burner.

4.4.6 복합 화염형 버너 (Combined Flame Burner)

복합 화염형 버너는 위에서 언급된 버너들의 장점을 조합한 버너를 말하며, 여기서는 한 예를 소개하기로 한다. 고속의 산화염과 수반되는 환원염을 상호 조합시켜 환상의 병류 화염을 형성하는 것으로, 고속 산화화염 중에 생성된 Prompt NO_x 및 Thermal NO_x를 수반되는 환원화염의 확산에 의하여 환원소멸하는 즉, 병류연소(Parallel Combustion)에 의하여 NO_x를 저감하는 연소기술이다.

중발과 혼합을 미리 일으켜 유해 배기가스의 발생을 감소시키는 방법이다.

주로 가스터빈 연소기 등에 많이 사용되는 방법으로 주연소영역에서는 당량비를 완전연소비보다 약간 적게하여 큰 UHC 및 CO의 변화없이 NO_x를 감소시킬 수 있다. 이 방법 중 주연소영역에서의 당량비를 더욱 낮추어 회박 연소시키면 NO_x를 더욱 저감할 수 있다.

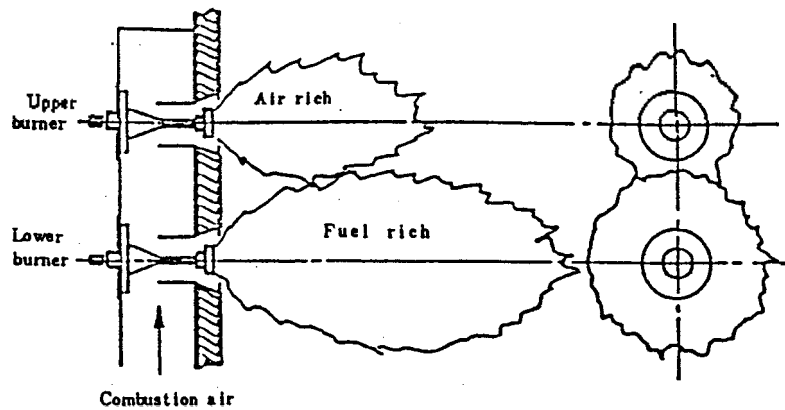


Fig. 4. Schematic diagram of off-stoichiometric combustion.

이 병류연소에 환원연소, 회석연소 등을 조합한 복합병류 연소기술에 의하여 NO_x는 물론 CO, 분진 UHC등을 효과적으로 제어할 수 있다.

환원 연소영역에서는 저온 환원연소에 의하여 Thermal NO_x 및 Prompt NO_x를 급속연소로 제어한다. 회석영역에서는 자기 재순환 연소가스에 의하여 회석된 미연분과 산화염의 연소가스 중에 남아있는 산소와의 느린 저온 회석연소에 의하여 NO_x를 억제한다.

4.4.7 예혼합 예증발형 버너 (Premixing, Prevaporizing Burner)

이 방식은 연소실에 연료가 유입되기 전에 연료의

4.4.8 과농회박 및 회박예혼합형 버너 (Rich-quench Lean-burning and Lean premixing Combustion Burner)

이방법들은 근본적으로 다단연소에 포함 되지만 NO_x를 저감시키는데 유망한 방법들이므로 별도로 소개하기로 한다.

과농회박연소는 주연소영역에서 초기에 연소에 필요한 공기를 덜 넣어 연료가 덜 타게 하여 화염의 온도를 떨어뜨린 후 그 나머지 연소에 필요한 공기를 연소실 후단에 재빨리 공급하여 급냉시키고 연소가 완료됨과 동시에 과잉공기가 남도록 하여 NO_x를 제어하는 방법이다. 고온의 입구조건에서도 역화나

자연점화 등의 위험이 없고 작동성이 뛰어나며 액체 연료가 질소를 함유하고 있을 경우에도 적합하다는 등의 잇점이 있다. 그러나 공기급냉에 한계가 있어 국부적인 고온부위가 생겨 NO_x가 발생할 가능성이 크고, CO 나 UHC이 충분히 산화될 수 있도록 시간이 길어야 하는 등의 제한으로 말미암아 아직 실용화되지는 못하고 현재 연구가 활발히 진행되고 있는 유망한 NO_x 저감 방법중의 하나이다.

회박예혼합 연소는 근본적으로 화염의 온도를 떨어 뜨리기 위하여 연소에 사용되는 공기보다 훨씬 더 많은 공기를 공급하여 NO_x를 저감하는 방법이다. 즉, 공연비를 증가시키므로써 NO_x량이 감소하게 되는데, 이 경우에는 급냉에 의해 CO나 UHC이 증가되기 때문에 다음과 같은 사항들이 신중히 고려되어야 한다.

경우 이를 액체 연료에 적용하기 위한 시도는 행하여지고 있으나 아직 성능실험에 의한 실용화가 입증되지 않은 상태이다.

4.4.9 촉매연소 버너 (Catalytic Combustion Burner)

촉매연소는 촉매가 연소를 연료의 가연한계보다 낮은 온도에서 일으키는 성질을 이용한 것으로, 연소실의 최고온도를 1000K으로 낮출 수 있으므로 NO_x를 상당량 줄일 수 있다. 이 경우에도 촉매반응기 상류지역의 국부적인 과농지역에 의한 자동점화와 시동시 촉매의 온도를 반응온도까지 가열하여야 하는 등의 문제점을 가지고 있으나, emission에 대한 규제가 강화됨에 따라 앞서 언급한 방법에 의한 제어는 한계가 있을 것으로 판단되어 촉매연소에 대한 연구에 관심이 모아지고 있다.

Table 2. 저 NO_x 연소기술과 문제점

NO _x 제어방법		Thermal NO _x 제어		Fuel NO _x 제어		NO _x 제어효과	고려하여야 할 문제점		
		화염온도 저하	고온영역에서의 체류시간 단축	연소영역의 O ₂ 농도 저감	화염온도 균일화		열효율 또는 출력의 저하	분진, CO, HC의 증가	연소실 증대
저 NO _x 버너	자기순환형	○	○	◎	○	○	△		△
	분할화염형	◎	○	◎		◎		△	
	다단연소형	◎	○	◎		◎			
	농염연소형	◎	○	○		◎		△	
배출가스 재순환		◎	○	○	○	◎	△	△	△
물(증기)분사		◎	○			◎	△		
다단연소		◎	○	◎		◎			
연료전환				○	○	◎			

1) 연료와 공기는 잘 혼합되어야 하며 (Well Mixed), 만약 잘 혼합되지 않으면 국부적으로 고온영역이 발생하므로 저 NO_x를 얻을 수 없다.

2) 연료와 공기가 연소기의 바깥쪽에서 혼합되므로 자연점화될 가능성이 있다.

3) NO_x를 줄이기 위하여 회박 연소를 하므로 가변형상 연소, 다단 연소 등의 방법으로 안정성을 증가시킬 필요가 있다.

이와같은 회박 예혼합 제어 방식은 주로 가스 연료에 적합하다고 알려져 있으며, 가스터빈 연소기의

5. 결론

이상과 같이 NO_x는 SO_x등과 더불어 중요한 대기 오염 물질로 자리를 차지하고 있으며 대부분이 화석 연료의 연소에서 생성되고 있다. NO_x의 종류는 Thermal NO_x, Prompt NO_x, Fuel NO_x가 있지만 그 생성기구가 비교적 잘 알려져 있는 Thermal NO_x의 제어가 NO_x 저감의 주 대상이었다. 에너지와 관련된 많은 부분의 연구개발이 환경 문제와 연계되어 있으며 가장 두드러지고 있는 한 분야가 바로 저 NO_x연

소기술의 개발이다. 지금까지 소개된 기술은 Table 2에 보인 바와 같이 아직도 많은 문제점들을 가지고 있으므로 앞으로 더욱 적극적인 연구의 진행이 기대된다.

참고 문헌

- 1) Sarofim, A. F. and Flagan, R. C.: NO_x Control from Stationary Combustion Source, Prog. Energy and Combust. Sci., 2 (1968)
- 2) Heap, M. P. et al.: Burner Design Principles for Minimum NO_x Emissions, PB22410, USEPA (1973)
- 3) 김석준: 반응기구론에 의한 탄화수소화염의 일산화 질소 생성에 관한 연구, 한국과학기술원 석사 학위논문 (1985)
- 4) 신규식 외: 질소산화물 저감대책 연구, 한국동력자원연구소 연구보고서, KRC-85C-J01 (1987)
- 5) 조광명: 대기오염, 청문각 (1990)
- 6) Hermanson, J. C.: Survey of Recent NO_x Emissions Research, UTRC90-37, United Technologies Research Center (1991)
- 7) Flagan, R. C. and Seinfeld, J. H.: Fundamentals of Air Pollution Engineering, Prentice Hall (1988)