

산업용 가스터빈의 저NOx 연소기

신 동 신

Low NOx Combustors in a Industrial Gas Turbine

Dong-Shin Shin



- 신동신(홍익대 기계공학과)
- 1960년생
- 연소공학을 전공하였으며, 가스터빈 연소실의 해석 및 설계 전산유체물 이용한 연소해석과 연소난류모델에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

가스터빈은 항공기의 엔진을 비롯하여 선박, 자동차, 탱크 및 발전용의 동력원으로서 저소음, 저공해의 특성을 바탕으로 보수의 편리성, 조작의 간편성 등의 장점으로 비약적으로 활용도가 확대되고 있다. 선진국에서는 가스터빈 제조업이 주요 산업의 위치를 차지하고 있으며, 많은 개발도상국에서도 주요 산업으로 부상하고 있는 실정이다. 국내에서도 각종 기업체 등에서 기술개발 및 도입에 치열한 경쟁을 벌이고 있고 각 연구기관 등의 전문 연구자들의 수가 비약적으로 증가하고 있는 추세이며, 각종 학회 등을 통한 인적 교류도 활발히 진행되고 있다.^(1,2)

최근 환경문제와 관련하여 정제된 석유 연료가 아닌 천연가스와 같은 연료의 사용이 증가하면서 산업용 가스터빈의 연소기술에 대한 관심이 집중되고 있다. 가스터빈 연소로 생성되는, 환경을 위협하는 오염물은 연기, 수증기, 일산화탄소(CO), 미연 탄화수소, NOx, SOx 등이 있다. 수증기 및 일산

화탄소는 지구 온실화에 영향을 미치고 있으나 그다지 심각한 정도는 아니며, SOx는 독성이 있으나 연료 정제시 제거되어질 수 있다. NOx는 지구의 오존층을 파괴하여 생태계를 위협하기 때문에 오염 배출물중 가장 심각하게 고려되어지고 있다. 미국에서는 법으로 산업용 가스터빈의 NOx의 양을 규제하고 있는데 15% 산소배출농도에 대하여 1984년에 75 ppm에서 1993년에 30 ppm으로 낮추어 규제하고 있다. 일본도 미국과 비슷한 수준으로 규제하고 있으며, 따라서 최근의 가스터빈 연소기술은 저NOx 연소기 개발에 중점을 두고 있다. 이 글은 산업용 가스터빈의 저NOx 연소기에 대한 것으로 저NOx 연소에 관한 개론 및 가스터빈 연소기의 저NOx화 방법, 그리고 미국과 일본의 최근의 저NOx 연소기 개발동향에 대하여 다루고자 한다.

2. 저NOx 연소에 관한 개론

가스터빈 주요 배출물의 농도는 연소기내의 온도, 체류시간, 농도 등에 관계가 있다.

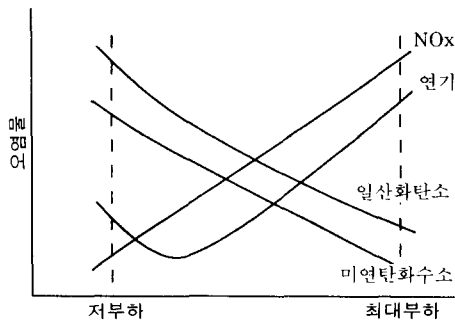


그림 1 가스터빈 연소기의 배출물 특성

이러한 조건들은 연소기에 따라 다르며, 같은 연소기라도 작동 조건에 따라 다르다. 오염물 생성의 특성을 살펴보면, 일산화탄소와 미연 탄화수소는 저부하조건에서 최대가 되며 부하가 증가함에 따라 감소하게 된다. 반면에 질소산화물과 연기는 저부하에서는 그다지 크지 않으나 고부하에서 최대가 된다. 이러한 특성은 그림 1에 나타나 있다. 이 절에서는 질소산화물 연소 및 질소산화물을 줄이는 방법에 대하여 살펴본다.

2.1 NOx 생성 메카니즘

NO는 화염의 고온 지역에서 대기의 질소가 산화하여 생성되는데 그 과정은 흡열반응이며 약 1,800 K의 온도 부근에서 상당한 양이 생긴다. 일산화탄소나 미연 탄화수소와는 달리 NO는 연소기 내의 뜨거운 중심부에서 생성되며, 그 양은 최고 부하조건에서 최대가 된다. NO는 세 가지 다른 메카니즘에 의해 생성되는데 첫째가 열(thermal) NO로서 화염 뒤쪽에서 대기중의 질소의 산화에 의해 생성되며, 두번째는 순간(prompt) NO로서 화염면 앞에 빠른 속도의 반응에 의해 생기며, 세번째인 연료 NO는 연료에 포함된 질소의 산화에 의해서 생기게 된다. 열 NO의 생성 메카니즘은 연소에서의 Zel-dovich 연쇄반응 메카니즘으로 널리 알려져 있으며 다음과 같다.

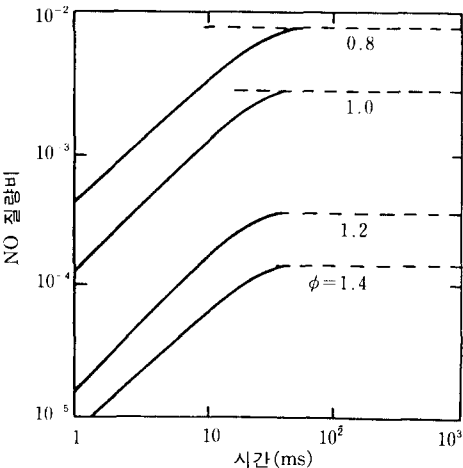


그림 2 시간과 당량비에 대한 계산된 NO 질량비; CH₂-공기 혼합물, P=1 MPa, T=2400 K

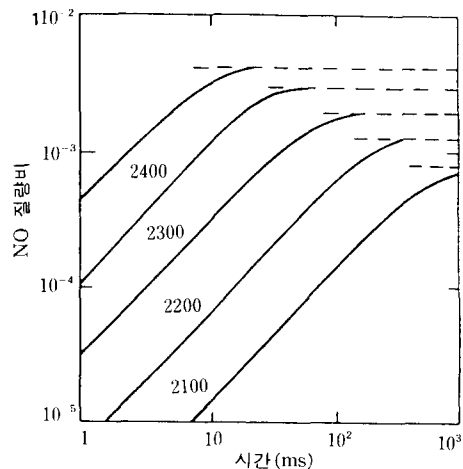
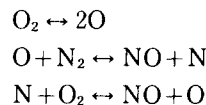


그림 3 시간과 온도에 대한 계산된 NO 질량비; CH₂-공기 혼합물, P=1 MPa, T=2400 K, phi=1.0



계산된 열 NO의 평형 농도는 일정 온도에서 당량비가 감소하면 증가하며, 일정 당량비에서는 온도가 증가함에 따라 증가한다(그림 2와 3). 실제 연소에 있어서 온도는

당량비에 영향을 받으며 NO 생성은 Stoichiometric한 상태보다 약간 희박한 상태에서 최고가 되는데 이는 질소와 반응할 수 있는 산소의 양과 관계가 있다. 연소시 온도는 약간 과농한 상태에서 최고가 되나 산소는 모두 연료와 화학 반응을 일으키게 되므로 NO는 온도와는 달리 최고치에 도달하지는 않는다. 그림 4는 연소기 흡입공기의 온도와 NOx의 관계를 나타낸 것으로 흡입공기의 온도가 연소 온도에 영향을 미치기 때문에 흡입공기의 온도가 증가하면 NOx의 양도 증가하게 된다. 낮은 온도의 과농화염에서 종종 순간 NO가 초기 화염의 지역에 존재하는데 이 메카니즘은 아직 확실히 알려져 있지는 않다. 연료 NO는 연료 정제시 질소를 처리함으로써 방지할 수 있다.

위의 NO는 연소가스가 연소기에서 배출되어 온도가 낮아지거나 연소기 내에 과잉공기가 존재하는 경우 NO₂로 변하게 된다. 정격부하에서 연소기 내에서 생성되는 NO₂의 양은 적으나 저부하(idle) 상태에서 생성되는 NO₂의 양은 전체 NOx의 약 50%를 차지한

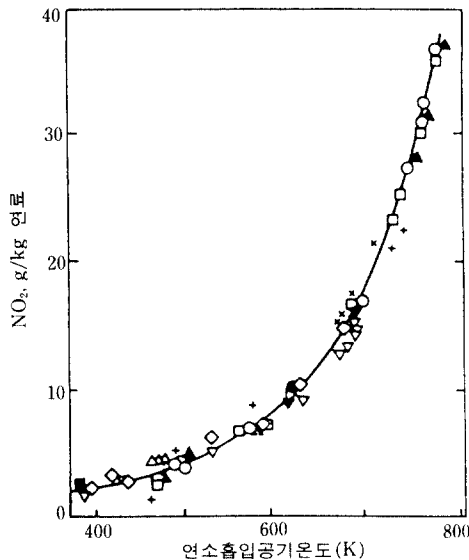


그림 4 연소기 흡입 공기 온도와 엔진 NOx 오염배출물의 상관관계

다. 이러한 결과는 낮은 온도에서 NO₂가 NO보다 안정하다는 사실과 일치하는데 예측에 따르면 700 K에서 25%의 NO가 NO₂로 변화하는데 반하여 900 K에서는 단지 6%만이 변한다.

2.2 NOx를 줄이는 방법

NOx 생성에 가장 중요한 인자는 온도이다. 실제적인 응용에 있어서 연소기 내의 다른 파라미터들을 화염온도에 영향을 주는 인자들로 고려할 수 있으며, 따라서 NOx를 줄이기 위해서는 연소실 내의 온도를 낮추는 것이 가장 중요하다. 그외에 반응영역에서 부분적으로 뜨거운 지역을 없애 NOx 생성률이 높은 영역이 없도록 하며, NOx가 생성될 수 있는 연소실 내의 체류시간을 최대한 줄이도록 한다.

저NOx 연소기를 개발하는 가장 현실적인 방법은 연소기 라이너의 형상 및 공기 유량 배분 방법을 변화시키거나, 좀더 복잡한 연료 분사 방법을 채택하거나, 경제적으로 냉각 공기를 사용하는 새로운 벽 냉각 방법을 채택하는 등의 기존의 연소기를 약간 수정 변형하는 것이다. 이러한 방법은 기존의 연소기를 사용할 수 있는 장점과 제품이 결국 오염 배출물과 연소기 성능에 있어서 어느 정도의 한계를 지니는 단점을 가진다.

NOx를 줄이는 실제적인 접근 방법은 다음과 같다.

2.2.1 희박 주연소지역

이전에는 연소기의 크기를 최소화하고 점화를 돕기 위하여 연소실 내의 주연소 지역을 Stoichiometric한 상태나 약간 희박한 상태로 설계하였으며, 연소온도를 낮추기 위하여 과잉 공기를 공급하여 NOx 생성에 상당한 감소를 가져 왔다. 그러나 주연소지역의 온도의 저하는 CO와 미연 탄화수소의 증가를 가져오기 때문에 주의해야 한다.

2.2.2 과농 주연소지역

과잉 공기와 마찬가지로 과잉 연료도 연소 온도를 낮추어 NOx 배출물을 줄일 수 있다. 과농 주연소지역은 과농한 생성물들이다. 터빈 입구 조건을 만족하도록 stoichiometric한 상태를 거쳐야 하며, 이러한 제약은 CO와 미연탄화수소가 산화할 수 있는 긴 시간을 요구한다.

2.2.3 균일한 연소

연료 분무와 그 위치의 향상 및 라이너 벽을 따른 큰 압력 강하는 연소 전의 연료와 공기의 혼합을 향상시키고 연소 온도가 균일하게 한다. 공연비가 Stoichiometric한 경우에는 균일한 연소는 NOx의 양을 증가시키거나 희박연소와 같이 사용되는 경우에는 NOx의 양을 상당히 줄일 수 있다.

2.2.4 연소실 체류 시간 감소

고온에서 연소 생성물이 보내는 시간을 감소시킴으로써 NOx의 양을 줄일 수 있다.

2.2.5 물 및 수증기 분사

NOx 생성은 온도에 상당히 의존하기 때문에 연료와 공기의 혼합물에 불활성 또는 비가연성 물질을 넣음으로써 NOx의 양을 줄일 수 있다. 주연소지역에 연료공급유량의 0.5 내지 2배 정도의 잘 분무된 물을 분사하는 경우 NOx의 상당한 양을 줄일 수 있다고 알려져 있으며, 고온지역 즉 주연소지역에 직접 분사하는 것이 흡입 공기에 분사하는 것보다 훨씬 효과적이다. 이러한 물분사의 단점은 많은 양의 순수한 물을 보내고 저장하는 등의 설비가 필요하다는 것이나 일단 설치되면 오랜 기간 동안 신뢰성을 가지고 사용할 수 있다.

2.2.6 배출가스 재순환

배출가스를 불활성 물질로 사용하는 경우이다. NOx 오염물을 줄이기 위해서는 주연

소지역에 보내지기 전에 냉각되어야 하며, NOx의 양을 줄일 수는 있으나 CO의 양이 많아지고 연소기가 커지고 무거워지며 복잡해지게 된다.

3. 가스터빈 연소기의 저NOx화 방법

2절에 기술한 방법들이 기존의 연소기들로부터 오염 배출물들을 줄일 수는 있으나 결과적으로 오염 배출물과 연소 성능에는 어느 정도 제약이 있게 된다. 고급 연소기 설계에 있어서는 NOx뿐만 아니라 다른 오염물들도 줄일 수 있어야 하는데 그림 5는 가상적인 연소기에서 NOx와 CO의 양을 주연소지역의 온도에 대하여 나타낸 것으로 CO의 많은 양이 1600 K 이하에서 생성되며 반면에 NOx의 많은 양은 1730 K보다 높은 곳에서 생성되는 것을 보이고 있다.⁽³⁾ 따라서 1600 K와 1730 K 사이가 허용할 수 있는 CO와 NOx의 양이 공존하는 범위가 되며 가스터빈의 전작동 부하내에서 연소실의 주연소지역 온도를 위의 범위에 들어가도록 하여야 한다.

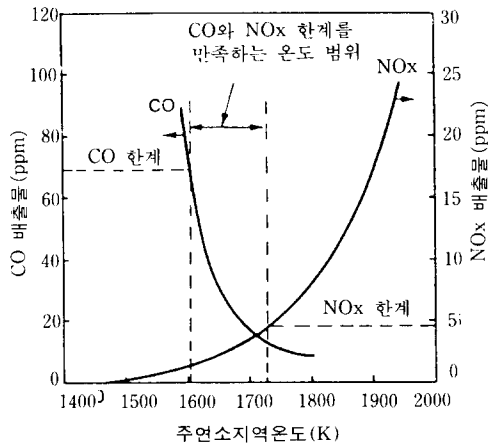


그림 5 주연소지역의 온도가 CO와 NOx 오염 배출물에 미치는 영향

3.1 가변 형상(Variable Geometry)

가변 형상 연소기는 최대 동력하에서는 연소기의 앞부분에서 많은 양의 공기를 받아들여 NOx의 양을 줄이고 펄름 냉각을 위한 공기의 양을 제공하는 것이며, 부하가 감소함에 따라 이러한 공기의 양을 회석지역으로 보내어 감소된 연료 공급에 맞추어 주연소지역의 온도를 오염물 배출을 줄일 수 있는 낮은 온도로 유지하는 것이다. 가변 형상 연소기는 이상적으로 예혼합-예분무 연료 분사 시스템과 같이 사용하면 효과를 볼 수 있으며, NOx를 만드는 고온 지역과 CO를 만드는 저온 지역을 피할 수 있다.

3.2 다단 연소(Staged Combustion)

연소 과정이 여러 단계에 걸쳐서 일어나도록 배열하는 것으로 반경, 회전 및 축방향의 다단 연소가 가능하다. 회전 방향의 다단 연소는 불균일 혼합으로 인하여 NOx의 양을 증가시키기 때문에 실제적으로 응용되지 않으며, 균일한 혼합을 일으키기 위해서는 연료와 공기를 동시에 다단으로 연소시키도록 하여야 한다. 통상 축방향의 다단 연소가 보편적이며, 주연소지역은 잘 혼합된 연료 분사를 가지고 가벼운 부하에서 작동하도록 한

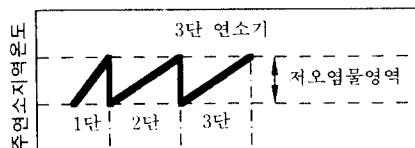
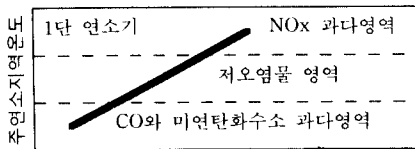


그림 6 저오염 배출물을 위한 다단 연소

다. 이러한 주연소지역은 저부하 상태 및 연소실내 하류의 연소지역에 필요한 파이롯트화염을 제공한다. 다단 연소는 주연소지역외에 각각 다른 잘 혼합된 연료와 공기를 공급하는 한 개 이상의 연소지역으로 구성된다. 가변 형상과 다단 연소는 모든 작동 조건하에서 최소의 오염 배출물을 가지도록 연소실내의 온도를 조절하는 것이 목적이다. 그림 6은 3단 연소기에서의 각단의 연소에 의한 연소 온도의 조절을 나타내고 있다.

3.3 희박예혼합-예분무연소(Lean Premix-Prevaporize Combustion)

이 방식은 연소가 일어나기 전에 연료의 증발과 연료와 공기의 혼합이 완전하게 일어나는 것을 목표로 한다. 액적 연소를 피하고 주연소지역에서 희박연소가 일어나도록 함으로써 반응 온도가 낮아지고 연소실내의 고온 지역을 없앴으로써 NOx 배출물을 현저하게 줄일 수 있다. LPP 연소기는 가변 형상과 같이 사용되어질 경우 매우 효과적이거나 가끔 소멸현상(weak-extinction)을 일으킬 수 있으므로 점화 및 연소 상태를 유지할 수 있는 파이롯장치 등이 필요하게 된다. 이외에 연료가 연소지역에 들어가기 전에 증발하기 위하여 필요한 체류 시간은 흡입 공기 온도가 높은 경우에 자동 점화 또는 역화현상을 일으킬 수 있다. 더욱이 고부하 조건하에서 희박연소를 위하여 라이너의 앞부분에 공급되는 공기 유량은 저부하 조건하에서 화염 날림(blow-out)현상을 일으킬 수 있다.

3.4 촉매 연소

촉매는 연소가 연료의 가연 한계보다도 낮은 온도에서 일어날 수 있게 하기 때문에 기존의 연소기보다 훨씬 낮은 온도인 약 1,000 K의 연소실 최고 온도를 가능하게 한다. NOx 오염물이 온도에 대하여 거의 지수함

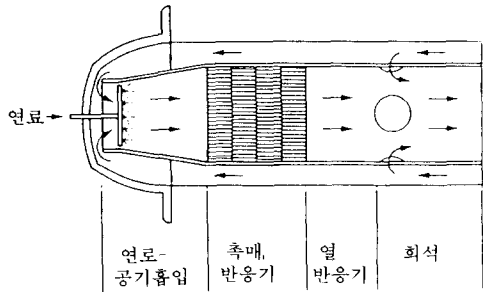


그림 7 축매 반응기의 구조

수적으로 변하기 때문에 감소된 연소 온도에서 NOx의 양은 상당히 줄어들게 된다. 그림 7은 축매 연소기의 구조를 보이고 있다. 연료는 반응기의 상류에서 분사되어지며, 흡입 공기와 혼합되어 축매 반응기에 보내어진다. 축매 반응기는 몇 개의 다른 축매로 구성되어지며 흡입구에서 가까운 쪽에서부터 낮은 온도에서 활발하게 반응하는 축매를 위치하도록 한다. 축매 반응은 전체 반응의 약 20%를 차지하며 축매 반응기 하류에 열반응기가 위치하여 연소기 내의 최고 온도에 도달하도록 한다.

축매 연소기의 문제점 중의 하나는 축매 반응기 상류 지역에서의 자동점화현상이다. 비록 공연비가 희박 연소가 가능한 범위보다 낮다고 할지라도 지역적으로 과농한 지역이 존재하여 자동점화가 일어날 수가 있기 때문에 점화지연시간보다 빨리 혼합이 이루어지는 것이 중요하다. 또한 시동시에는 축매를 반응 온도까지 가열하기 위한 장치가 필요하다.

3.5 물 및 수증기 분사

연소지역에 물 및 수증기를 분사하여 열을 흡수함으로써 연소 온도를 낮추는 방법이다. 미국의 General Electric 사는 연소기의 연료 노즐 주위에 샤워기 형태의 물분사기를 설치하여 물이 선회하면서 흡입되는 공기와 혼합되도록 하여 그림 8에서 보는 바와 같이

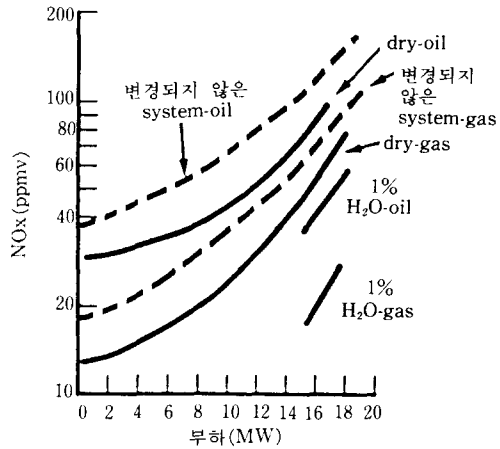


그림 8 물분사가 NOx 오염배출물에 미치는 영향 - MS5001 가스터빈

NOx의 양을 감소시켰다.⁽⁴⁾ 이 장치는 상당히 간단하기 때문에 기존의 연소기에 물분사 노즐을 가지는 연료 노즐을 장착함으로써 쉽게 NOx를 줄일 수 있다. 실제적으로 터빈을 운전할 경우 물의 양은 터빈의 수명과 관련하여 제한받게 되는데 이는 물로 인하여 터빈 내의 동압이 증가함과 관련이 있다. 터빈 동압의 진동은 연소 과정에 의해서 일어나며 연소기 내의 음향 모드와 결합하여 장치의 마모를 증가시키며, 극단적인 경우에는 피로에 의한 파괴가 일어날 수도 있다.

물과 마찬가지로 수증기를 분사하는 경우에도 상당한 NOx의 양을 줄일 수 있다.⁽⁴⁾ 압축기에서 배출되는 공기에의 수증기 분사량은 통상 흡입 공기 유량 무게의 약 5% 정도까지가 허용되는데 그림 9에서 보는 바와 같이 현저하게 NOx의 양이 줄어드는 것을 알 수 있다.

수증기 분사는 물분사만큼 연소기 내의 동압을 증가시키지는 않는다.

물 및 수증기 분사는 NOx의 양은 줄일 수는 있으나 몇 가지 단점을 가지게 된다. 우선 물을 연소 온도까지 가열하는데 필요한 연료의 양이 부가됨으로써 전체 효율이 감소하게 된다. 예를 들면 압축 공기 유량 무게

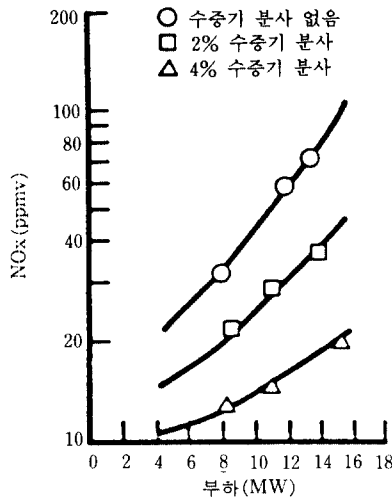


그림 9 압축기 배출 공기 중 수증기 분사가 NOx 감소에 미치는 영향 — MS5001 가스터빈

의 1% 정도의 물의 양을 분사하는 경우 출력은 2.7% 증가하며 효율은 2% 감소하고 연료 소비율은 4.7% 증가하게 된다. 물론 인한 유동 질량의 증가로 출력은 증가하지만 연료 소비의 증가를 가져온다. 또한 뜨거운 터빈 노즐 부근에서부터 연소실 내의 하류까지 침전과 부식을 방지하기 위하여 물은 오염되지 않아 보일러에 공급되는 정도의 순도를 가져야 하며, 상당한 양이 필요하게 된다. 예를 들면 연료 유량과 같은 양의 물을 분사하는 경우 약 1.4% 정도 열효율이 감소하며 매일 3900톤의 물이 필요하게 되고, 따라서 가스 터빈의 설치 위치가 제약을 받으며 물처리를 위한 장치 및 비용이 필요하다. 위와 같은 단점 때문에 최근의 가스터빈 연소기는 습식에서부터 물 및 증기를 사용하지 않는 건식으로 옮겨져 가고 있다.

4. 최근의 저NOx 연소기의 개발 동향

4.1 MIT 대학의 저NOx 연소기⁽⁵⁾

미국 MIT 대학의 연구자들이 1993년에 개

발한 과농 연소 및 회박 연소 영역을 포함하고 있는 연소기는 천연가스의 연소시 NOx를 약 100 ppm에서부터 15 ppm까지 줄이는데 성공하였다. MIT의 연구자들은 다단 연소가 NOx를 줄이는데는 성공적이거나 몇 가지 단점을 가지고 있다고 지적하고 있다. 초기 단계의 연소가 과농 연소일 뿐만 아니라 질소를 포함하는 시안화물이나 암모니아를 NOx가 아닌 질소 분자로 만들기 위하여 매우 고온이 됨으로써 열전달이 일어나는 표면을 부식시키게 된다. 반면에 회박연소지역의 온도를 매우 낮춤으로써 연소 공기의 질소가 질소산화물을 만들지 못하게 하고 있는데 이를 위해 열을 회박연소지역으로부터 다른 과정으로 전환시키고 있다. 그러나 연소를 촉진시키기 위해 사용되는 많은 양의 공기를 회박연소지역에 불어 넣는 장치는 연소기를 매우 비싸게 만든다.

이를 해결하기 위하여 MIT의 연구자들은 실험용으로 반경방향으로 성층화된 화염 중심을 가지는 연소기(RSFC : radially stratified flame core)를 개발하였다. 그림 10에서와 같이 연료는 중심의 노즐로부터 연소기에 분사되어진다. 예열된 공기는 연료 분사 주위의 세 개의 동심 원형 노즐로부터 보내진다. 세 노즐중 중심에 가장 가까운 것은 심하게 선회하는 공기를 보내어 화염 경계에 회전층을 형성하여 과농한 환경을 가지는 화염 중심을 만들며 반응이 충분히 일어날 수 있는 체류시간을 가질 수 있게 한다. 연소기의 중간 노즐로부터는 더욱 많은 공기나 재순환된 배출가스를 완만한 선회하는 공기를 연소실에 보내도록 한다. 바깥 노즐로부터의 선회하는 공기는 과농연소 지역의 하류에 재순환 영역을 만들어 초기연소단계의 미연연료를 공기와 충분히 혼합시켜 연소되도록 한다. 이 영역에서 열방출을 조절하여 NOx의 생성을 줄이도록 한다. 세 개의 공기분사노즐은 베인(vane)이 설치되어 있

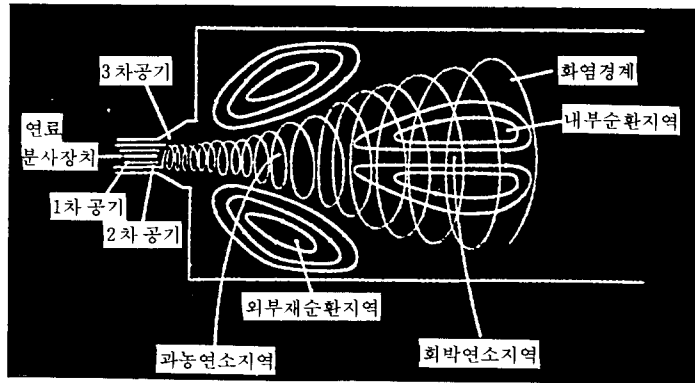


그림 10 유동 조절. MIT의 RSFC 연소기의 화염 주위의 공기의 회전은 효율적으로 공기와 연료를 혼합시키며, NOx의 감소를 가져온다

어 공기 유동의 회전 각도를 조절할 수 있다.

이 연소기는 NOx의 양을 더욱 줄이기 위해서 수증기 분사 및 배출가스 재순환을 사용하는데, 기존의 연소기에서 많은 양의 재순환 배출가스가 소염을 일으키는데 반하여 RSFC 연소기는 소염을 일으키지 않으며 안정된 화염을 유지한다. 또한 기존의 저NOx 연소기가 수증기나 배출가스를 연소실 전에 흡입 공기에 혼합시키는 것과 달리 수증기는 흡입 연료에 혼합시키고 배출가스는 중간 노즐을 통하여 일부분의 공기와 혼합시키는 것이 더욱 효과적이라고 한다. 이 연구자들의 보고에 따르면 많은 배출가스를 재순환하는 것이 화염을 안정시킬 뿐만 아니라 그을음 및 방향물 등을 줄이는데도 효과가 있다고 한다.

4.2 GE의 저NOx 연소기⁽⁴⁾

GE(General Electric)는 오래전부터 저NOx 연소기를 개발하여 왔으며, 1980년대에 6개의 주노즐이 환형으로 배열되고 1개의 부노즐이 중심체에 놓여있는 건식 2단 연소기를 보고하였다(그림 11). 이 연소기는 (i) 주노즐로부터 중심체의 끝까지의 주연소지

역, (ii) 2단 연소실의 시작으로부터 회석 구멍까지의 부연소지역, (iii) 회석 구멍으로부터 라이너의 끝까지의 회석 지역의 3개 지역으로 구성된다. 점화, 가속 및 저부하작동은 주연소지역의 화염만을 사용하며, 부연소지역의 노즐로 연료가 공급되면 주연소지역의 화염에 의하여 점화되어지는데 이는 전형적인 회박-회박 연소이다. 화염이 전부 부연소지역에 존재할 때까지 부연소지역의 연료의 공급은 계속 증가하며, 이후에는 주연소지역의 연료의 공급은 점차적으로 차단된다. 다시 주연소지역에 연료가 공급되나 연소되어지는 않으며, 부연소지역에의 공급은 줄어들어 예혼합연소가 일어나며 연료는 오염배출

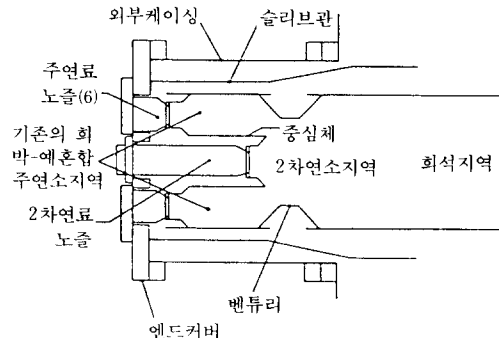


그림 11 GE의 건식 저NOx 연소기

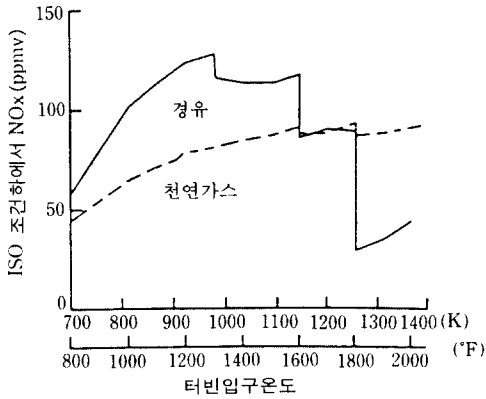


그림 12 NOx 오염배출물 — 천연가스와 경유의 경우

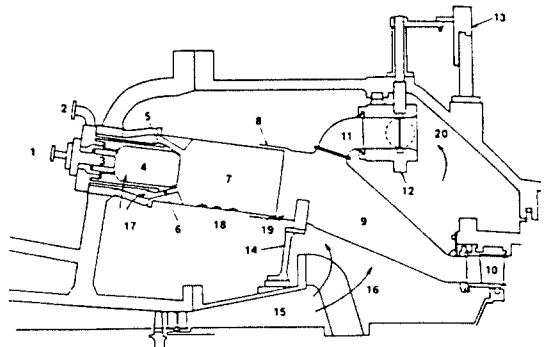
물이 최소가 되도록 분리되어 공급된다.

그림 12는 천연가스 및 경유를 사용한 경우의 NOx 배출물의 특성을 나타내고 있다. 경유의 경우는 주연소, 회박-회박 연소 그리고 예혼합연소의 순서이고, 천연가스는 주연소와 회박-회박 연소의 순서이다. 천연가스의 예혼합연소는 경유의 경우와 비슷한 경향을 나타낸다. 이와 같은 연소기를 작동하는 동안에 대두되는 문제들로서는 경유의 경우 예혼합비율이 상당히 높을 때 화염이 예혼합

지역으로 전파되어 들어가는 역화현상이 있고, 천연가스의 경우는 낮은 화염온도하에서 화염날림현상이 있는데 이들을 해결하기 위하여 축방향 선회기를 2단 연료공급장치에 설치하여 화염을 안정시키고 화염 날림을 방지하도록 한다. 또한 상류지역의 벤츄리관을 긴 경사를 가지는 부분으로 대치하여 역화현상을 방지하고 높은 비율의 예혼합화염을 가능하게 하고 중심 부근에 많은 공기를 불어 넣어 혼합을 활발하게 함으로써 더욱 NOx의 양을 줄이는데 성공할 수 있다.

4.3 미츠비시(Mitsubishi) 저NOx 연소기⁽⁶⁾

일본의 미츠비시 중공업은 오랜 동안 가스 터빈을 개발하여 왔으며, 1980년부터는 물이나 수증기를 사용하지 않는 건식 연소기의 개발에 착수하여 1984년에 1090-MW LNG 병합 사이클 플랜트용 120-MW 가스터빈에 저NOx 연소기를 설치하였다. 그림 13은 기존의 확산 노즐의 파이롯 화염 지역과 예혼합 노즐의 주연소 지역으로 구성된 건식 연소기의 구조를 나타낸다. 주연료는 4개의 관을 통하여 원주방향의 기화기에 공급되어 기



- | | | |
|------------|------------|-------------|
| 1. 파일럿연료공급 | 8. 클램셀 | 15. 디퓨저 |
| 2. 주연료공급 | 9. 트랜지션피스 | 16. 압축기배출공기 |
| 3. 파일럿연료노즐 | 10. 터빈노즐 | 17. 연소공기 |
| 4. 파일럿화염지역 | 11. 바이패스엘브 | 18. 냉각공기 |
| 5. 주연료노즐 | 12. 나비밸브 | 19. 회석공기 |
| 6. 예혼합노즐 | 13. 외링 | 20. 바이패스공기 |
| 7. 주연소지역 | 14. 블랙시블지지 | |

그림 13 미츠비시 중공업 건식 저NOx 연소기의 구조

화기의 벽으로부터의 공기에 분사되어진다 (그림 14). 예혼합 노즐의 형태와 길이는 역화를 방지하도록 구성되어지며, 연소 공기의 약 31%가 파이롯 화염에 사용되어지고, 57%가 주연소 지역에, 나머지 12%가 회석에 사용된다.

저부하 및 시동시에는 총 연료 유량은 낮으며 파이롯 지역만이 연료가 공급되고 공기 바이패스 밸브는 잠겨진다. 약 38%의 부하가 걸리어 주연소지역에 연료가 공급되기 직전에 바이패스 밸브는 완전히 열리고 약

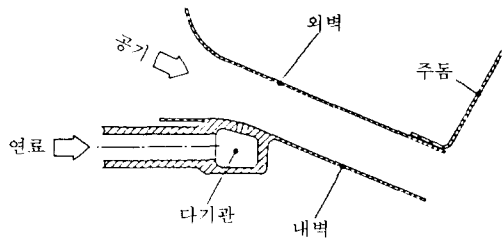


그림 14 미츠비시 중공업 전식 저NOx 연소기의 예혼합 노즐

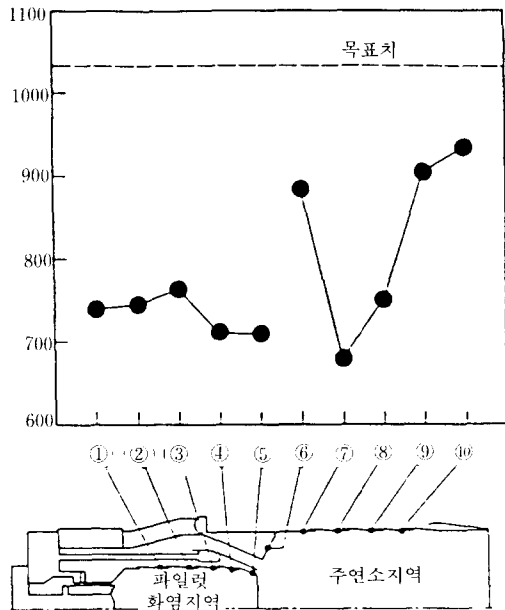


그림 15 미츠비시 중공업 전식 저NOx 연소기의 라이너 온도

35%의 공기가 파이롯과 주연소지역을 통하지 않고 직접 연소기 하류로 공급된다. 이후에는 주연료가 분사되어지고 파이롯 화염과 주화염이 적절히 존재하도록 분사되어지며 엔진의 부하가 증가하면 공기 바이패스 밸브는 점진적으로 닫히어 파이롯 화염과 주화염의 공연비가 일정하도록 한다. 미츠비시의 실험 결과에 따르면 이 연소기의 가장 적절한 당량비는 전작동 조건하에서 약 0.7이며, NOx는 75 ppm 이하였다. 그림 15는 측정된 라이너의 온도를 나타낸다. 주연소지역의 라이너의 최고 온도는 935 K이며, 파이롯 화염 지역의 최고 온도는 약 780 K이다. 파이롯 지역의 회박 연소와 주연소지역의 예혼합화염이 라이너의 온도를 낮추는데 효과가 있으며, 따라서 냉각공기 및 NOx의 양도 줄음을 알 수 있다.

4.4 히타치(Hitachi) 연소기

히타치는 1966년에 약 20MW급 가스터빈을 개발하기 시작하여 1992년에는 220 MW급으로 터빈 입구온도가 1260°C인 가스터빈을 개발하였으며, 전세계에 걸쳐 약 389대가 설치되어 작동하고 있다. 최근의 연구는 저 NOx 연소기에 중점을 두고 있으며, 열병합 발전용으로서 약 1300~1400°C의 고온 및 10~15기압의 고압에서 작동하는 저NOx 연소기를 목표로 하고 있다. 이미 37.5 ppm 저NOx 연소기가 제품화되어 일본 츄고쿠의 야나이 및 큐슈의 신오이타 열병합 사이클 플랜트에 설치가 되어 작동되고 있으며, 2단 연소기를 사용하는 20.8 ppm 저NOx 연소기는 개발에 성공하여 5년 이내에 제품화할 예정이며, 10 ppm 이하의 연소기를 5년 이내 개발하고 10년 이내에 제품화하는 것을 목표로 하고 있다.

히타치의 가스터빈 설계 및 제조는 히타치 공장이 맡고 있으며, 연구 및 개발은 산하 연구소가 담당하고 있다. 요소 연구는 기계

연구소가 재료, 연소 기초 및 측정 연구는 히타치 연구소가 그리고 각종 수치해석을 에너지 연구소가 각각 수행하고 있다. 실험은 GTD 센터 및 GREEN 센터에서 이루어지는데 GTR(Gas Turbine Research facilities)에서는 압축기와 터빈 및 연소기를 실험하며 GTD(Gas Turbine Demonstration facilities)에서는 25 MW와 17 MW급의 가스터빈을 실제로 설치하여 저NOx 연소기 및 연료 다양화 대응기술을 개발하고 있고 GTP(Gas Turbine Plant facilities)에는 약 130 MW급 가스터빈이 실제로 설치되어 작동하고 있으며, 여기서 생산되는 전기를 전력공사를 통하여 인근에 유상으로 공급하고 있다.

히타치의 저NOx 연소기를 살펴보면 상품화된 37.5 ppm 연소기는 2단 연소기로서 파이롯, F1 확산 연소기 및 F2 예혼합 연소기로 구성되어 있는데 내부 공기 유동을 조절 밸브를 통하여 제어하는 것이 특징이다. 20.8 ppm 연소기는 37.5 ppm 연소기에서 F1 확산 연소기를 예혼합 연소기로 대체한 것으로 따라서 2단 예혼합 연소기로 구성되며, 10 ppm 미만 연소기는 선회 또는 다연소기를 사용하는 모델 등을 고려중에 있다.

5. 맺음말

이상으로 저NOx 연소에 관한 개론 및 산업용 가스터빈의 저NOx화 방법 그리고 미국과 일본의 최근의 NOx연소기 개발 동향에 대하여 살펴보았다. NOx 생성에 가장 중요한 인자는 온도로서 연소실내의 온도를 낮추는 것이 NOx의 양을 줄이기 위해서 가장 중요하다. NOx를 줄이는 실제적인 접근 방법으로는 회박 주연소지역, 과농 주연소지역, 균일한 연소, 연소실 체류 시간 감소, 물 및 수증기 분사, 배출 가스 재순환 등이 있으며, 이러한 방법들을 가스터빈 연소기에 적용하는 방법으로는 가변 형상, 다단 연소, 회박 예혼합-예분무 연소, 촉매 연소, 물 및

수증기 분사 등이 있다. 미국의 MIT는 반경 방향으로 성층화된 화염 중심을 가지는 연소기를 개발하여 NOx의 양을 줄이는데 성공하였으며, GE도 건식 2단 저NOx 연소기를 개발하였다. 일본의 미츠비시 중공업도 확산 파이롯트 화염과 예혼합화염의 건식 2단 연소기를 개발하였으며, 히타치는 2단 예혼합 연소기를 사용하여 NOx의 양이 20.8 ppm 이하의 연소기를 개발하는데 성공한 후 10 ppm 이하의 연소기를 개발하는데 주력하고 있다. 이와 같은 저NOx 연소기를 개발하는데는 NOx 감소뿐만 아니라 점화 범위 확대 및 화염의 안정성도 고려되어야 하며, 현재로서는 LPP 연소기가 유망하나 회박연소의 화염날림현상, 자동점화, 역화, 예혼합과 예분무 등이 선결되어야 하며, 연소기 설계 및 개발을 위한 수학적 모델의 개발이 필요하다 하겠다.

참고문헌

- (1) 정석호, 1992, "가스 터빈의 연소 기술 및 연구 동향," 대한기계학회 춘계학술대회논문집(II), pp. 335~344.
- (2) 한국과학기술연구원, 1994, "Gas Turbine Study Circle 활동 보고서."
- (3) Lefebvre, A. W., 1983, *Gas Turbine Combustion*, McGraw-Hill.
- (4) Hilt, M. B. and Walso, J., 1984, "Evolution of NOx Abatement Techniques Through Combustor Design for Heavy-Duty Gas Turbines," *Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, Vol. 106, pp. 825~832.
- (5) Mechanical Engineering, May 1993.
- (6) Aoyama, K. and Mandai, S., 1984, "Development of a Dry Low NOx Combustor for a 120-MW Gas Turbine," *Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, Vol. 106, pp. 795~800. 