

가스터빈용 촉매 연소기를 위한 촉매-화염 복합 연소 특성연구 - 촉매버너 입구 형상의 영향

이경원^{1,2} · 정남조¹ · 유인수¹ · 조성준¹ · 서용석¹ · 강성규¹ · 송광섭¹ · 진광민²

Characteristics of Catalytically Supported Combustion for Gas Turbine Catalytic Combustor - Effects of the inlet shape of catalytic burner

Kyung-Won Lee^{1,2}, Nam-Jo Chung¹, In-soo Ryu¹, Sung-June Cho¹, Yong-Seog S대¹, Sung-Kyu Kang¹,
Kwang-Sup Song¹, Kwang-min Chun²

ABSTRACT

The characteristics of the catalytically supported combustion with Pd and Pd/Pt based catalyst using the bench-scaled high pressure combustor have been investigated up to 5 atm. This study aimed to investigate combustion characteristics of the stable flame attached to the exit of catalyst bed and NO_x emissions with respect to the position of axial and radial direction in the combustor. NO_x emissions were increased along the axial distance after the catalyst bed exit and radially decreased from the center to the wall of the combustor. At the higher pressure, the NO_x emission decreased slightly due to the lower flame temperature in the combustor at the high pressure.

Key Words : Catalytic Combustion, Gas Turbine, NO_x Emission, CST

1. 서 론

최근 세계적으로 환경문제에 대한 인식이 새롭게 변화하면서 모든 국가들은 산업발전을 지향하는 과정에서 과거의 산업개발 기조를 지양하고 환경 친화적인 산업구조로 변화하기 위한 규제강화 및 자구책을 모색하고 있으며, 정책적 제도 마련과 더불어 환경 유해물질을 처리할 수 있는 새로운 기술 개발에 총력을 기울이고 있다. 특

히 대기오염물질로서 발전 및 산업공정에서 발생하는 질소산화물, 일산화탄소, 탄화수소의 배출량을 저감하기 위한 환경규제가 강화되고 있다. 특히 질소산화물에 대한 국제적인 관심이 고조되고 있고, 우리나라에서는 대도시에서는 물론이고 일부 중소도시에서조차 질소산화물에 의한 스모그현상이 심화되고 있다. 국내 질소산화물 배출량의 대부분이 발전시설에서 나오며, 그 양 또한 연간 1,278,000톤으로 전체 발생량의 40% 이상을 차지하고 있다. 소규모 발전설비로서 가스터빈은 질소산화물의 배출량이 100 - 200 ppm에 이르고 있어 현재의 환경 규제치인 500 ppm이하에는 만족할 지라도 도심지에서 사용할 때 대기오염을 악화시킬 수 있다. 2005년 이후부터 질소산화물

1. 한국에너지기술연구원 촉매연소 연구센터

2. 연세대학교 대학원

배출에 대한 규제가 50 - 100ppm이하로 더욱 강화될 것으로 예상됨에 따라 수 ppm 수준 또는 질소산화물이 배출되지 않는 가스터어빈 연소기술이 필요하게 될 것으로 예상된다.

가스 터어빈으로부터 발생하는 NOx를 억제하기 위한 기술에는 연소처리 기술이 있고, 발생된 질소산화물을 제거하기 위한 기술에는 배연처리 기술이 있다. 배연처리 기술은 연소기에서 생성된 질소산화물을 대기로 배출하기 전에 배출구에서 수용액에 직접 흡수하여 제거하거나 혹은 안정화물인 질소로 환원시키는 기술이다. 수용액에 직접 흡수시키는 것은 습식법이라고 하며, 그렇지 않은 경우는 건식법이라고 한다. 현재까지는 경제성 및 공정의 간편성 등으로 인하여 건식법에 대한 연구가 많이 진행되고 상업화된 공정도 건식법이 대부분이다.⁽¹⁾

연소전 처리방법에는 운전조건을 개선하거나, 연소 장치를 개선하여 질소산화물의 발생을 억제하는 기술이 있다. 연소조건 개선에 의한 방법에는 질소산화물 생성에 영향을 미치는 인자들인 화염온도, 연소 영역의 산소농도 및 고온영역에서의 체류시간 등을 연소의 안정성에 크게 영향을 주지 않는 범위내에서 감소시킴으로써 연소 영역 내에서 질소산화물의 생성 반응을 억제시키는 방법이다. 이 방법에는 저과잉공기 연소, 열부하 감소, 공기예열온도의 저하등이 있다. 연소 방법의 변경은 연소설비의 구조를 변경하거나 설계를 전면적으로 바꿔 NOx배출을 억제시키는 방법으로 설비를 부분적으로 개조하거나 중설이 불가피하므로 운전 조건의 변경에 의한 억제방법보다 경제적 부담이 크지만 NOx저감 효과면에서 상대적으로 우수하다.

연소처리 기술의 핵심은 회박연소를 통한 화염의 온도를 감소시켜 화염온도에 절대적으로 의존하는 thermal NOx의 발생을 억제시키는 기술이다. 또는 주어진 연소조건에서 고온 연소 영역을 완화시키고 질소산화물의 생성에 관여하는 반응들을 억제시키는 기술이다. 그러나 회박연소는 혼합기가 회박해질수록 연소가 불안정해지는 문제점을 갖고 있다. 따라서 회박연소에 의한 질소산화물의 억제방법은 일정한 한계점을 가지고 있다. 이러한 문제점들을 극복할 수 있는 새로운 기술로서 촉매연소법이 활발히 연구되고 있다. 촉매연소는 촉매의 표면 반응을 활용하여 초회박 조건에서도 안정한 연소가 가능하게 한다. 화염연소만으로는 안정적인 연소가 어려운 회박조건에서도 촉매연소를 이용하면 안정적인 연소가 가능해진다. 이렇게 하여 화염의 온도가 thermal NOx가 급격하게 발생하는 1500℃ 이하로 낮추는 것이 가능하여 질소산화물의 생성을 근본적으로 해결할 수 있는 획기적인 방법이다.⁽²⁻⁴⁾

가스터어빈에서 촉매연소를 이용한 기술적인 방법으로는 모든 연료가 촉매층에 공급되어 층내에서 연소반응이 완결되는 완전산화 방식과 화염연소실에 연료의 일부를 직접 공급해주는 Hybrid 연소법, 화염연소가 부분적으로 일어나도록 결합한 촉매 보조 화염연소방식(CST, Catalytic Supported Thermal Combustion)이 있다. 촉매연소와 화염연소를 2단으로 구성하는 CST 연소방식은 연료의 연소에서 촉 방향의 최대온도가 촉매층과 떨어져 있어 촉매층의 온도를 1000℃이하로 유지하면서 완전연소가 가능하다. 즉, 전단에 위치한 촉매층에서는 연료의 일부분만을 표면연소하고 연료의 나머지는 촉매층 후단에 위치한 화염 연소실에서 연소시키는 방법이다. 촉매층 후단의 화염연소는 일반 화염연소와 다른 특징들을 가지고 있다. 첫째는 촉매층을 통과한 혼합기는 촉매층에서 표면반응에 의하여 발생된 열로 인하여 높은 온도(600 ~ 850℃)로 가열되며 또한 이로 인하여 혼합기량이 팽창하여 속도가 촉매층 입구에서 보다 2배 가까이 증가하여 고속 유동이 된다. 둘째는 촉매층을 통과한 혼합기는 촉매층에서 가스연료의 일부가 반응하고 나머지 부분만이 화염연소실에 들어가기 때문에 초회박 연소가 이루어진다. 셋째는 촉매층에서의 표면반응 과정에서 중간 생성물들이 발생하여 이들이 화염연소실에 들어가는 혼합기 중에 포함되게 된다. 이같이 촉매층 후단의 화염연소실에서는 고온, 고속 및 중간생성물이 포함된 초회박혼합기의 화염연소가 이루어진다. 이와 같은 촉매에 의한 연소방식은 다른 연소과정에 비하여 공해물질을 저감시키는 연소 과정을 제공할 수 있어 지난 몇 년 동안 CST촉매 연소기는 일본과 미국에서 활발히 진행되고 있다. 대표적으로 미국의 Catalytica Co와 Engelhard Co에서 개발 중이며, 일본에서는 진중귀금속공업(田中貴金屬工業)이 Catalytica와 공동으로 촉매연소 시스템을 개발하고 있다. 이외 스웨덴, 네덜란드, 프랑스 등 유럽에서는 산업용 보일러를 중심으로 촉매연소기술 응용제품 개발을 위한 고온 내열성 촉매 개발을 위해 연구중이다.⁽⁵⁻⁸⁾

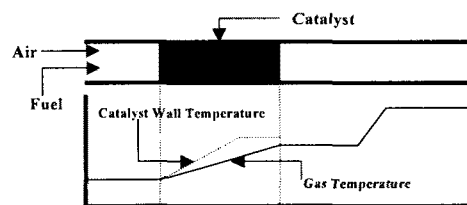


Fig. 1 CST 촉매연소방식

본 연구에서는 가스터어빈용 촉매 연소기로 가장 많이 사용되고 있는 촉매 보조 화염연소방식

을 채택하여, 2단 촉매 연소기를 제작하였다. 연료로는 LNG를 사용하였으며, 촉매 연소기에 사용할 촉매로는 앞단에 LNG에 대해서 산화성능이 우수한 팔라듐 촉매를 사용하고, 뒷단에는 팔라듐/백금 이원촉매를 사용하였다. 먼저 대기압 하에서 혼합가스의 유속, 농도, 촉매를 반응시키기 위한 초기 예열온도, 촉매의 크기와 압력에 따른 촉매연소기내의 온도 분포, 배기가스 성분 등을 분석하였으며, 특히 quartz region인 촉매끝단에서 30mm, 60mm, 120mm지점에서 연소 특성에 대해서 살펴보았다.

2 실험

2.1 촉매연소기 설계 및 제작

소형 가스터빈에 적용하기 위한 실험용 고압 촉매 연소기의 설계의 기본적인 개념은 유입되는 고압용 혼합가스의 누출이 발생하지 않고 촉매연소 이후 화염의 길이가 최소화 될 수 있도록 Fig. 2와 같이 설계 제작되었다.

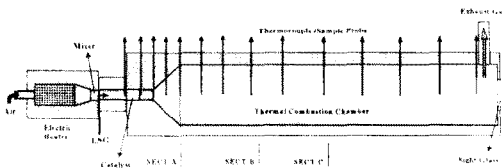


Fig. 2 촉매연소기 설계개념도

앞단에는 촉매층을 설치하고 촉매층 후반에는 화염연소실을 설치하였다. 고압용 촉매 연소기의 연소용 공기는 대형의 공기압축기에 의해 최대 16 kg/cm²으로 압축되어진 후에 regulator를 거쳐 약 10 kg/cm²의 압력으로 맞추어져, 유량계를 통해 공급되어 진다. 공급되어진 고압의 압축공기는 용량이 6 kw인 전기 히터에 의해 촉매가 반응되어질 수 있는 온도까지 가열되어지는데, 초기 예열 장치인 전기 히터는 연소기 내부의 단열재와 함께 내장형으로 장착하였다. 그리고 내부의 고압에 의해 발생할 수 있는 누출을 고려하여 히터의 전원선은 밀봉장치(Sealing)를 이용하여 처리하였다. 연료가스론 LNG(CH₄ 90.2%, C₂H₆ 6.5%, C₃H₈ 2.3%, 기타)를 사용하였으며, 연료고압부스터로 압축되어, 약 10 kg/cm²의 압력인 것을 바로 유량계를 거쳐 분사 노즐로 공급하였다. 공기와 연료의 유량계로는 고압용 MFC(Mass Flow Controller)를 사용하였다. 연료 분사장치 후반에는 고압으로 유입되는 공기와 연료의 혼합을 위해 다공판과 선회기를 설치하였다. 연소기에서 초기 예열부 및 혼합구간의 길이는 370 mm로 제작되었으며, 지름 및 길이가 각

각 30 mm, 60 mm인 촉매 지지체가 장착되어질 곳의 지름이 32 mm, 65 mm로 설계하였다. 촉매 연소 이후에 후단 화염연소가 이루어지는 곳은 촉매의 끝단에서부터 45.의 각도를 주어 촉매방향으로 60 mm이후의 길이에서부터는 지름이 150 mm로 확대시켰다. 이러한 설계의 의도는 촉매 연소를 통해 미연되어 나온 과농의 연료를 이용하여 후단 화염 연소(2차연소)시켜 충분히 연소기 내의 온도를 상승시키고 촉매 연소를 통해 연소기로 배출되는 미연 혼합가스 선속도가 감소되므로 화염의 길이를 최소화하여 연소기의 크기를 소형화하기 위한 방법이다. 이러한 연소 현상은 연소기의 촉매방향 끝단에 지름이 112 mm인 사이트글라스를 이용하여 육안으로 관찰 할 수 있게 하였다. 전체 연소기의 길이는 1000 mm로 하였으며, 연소기 전체는 Castable을 이용하여 단열 하였고, 최종 외장은 스테인레스 스틸로 제작되었다.

2.2 가스조성 및 온도측정

전체 시스템의 온도 측정은 열전대를 이용하여 측정하였으며, 비교적 온도가 낮은 영역에서는 K-Type 열전대를 사용하였고, 화염 및 촉매연소가 활성화되는 부분에서는 R-Type 열전대를 사용하여 온도를 측정하였다. 본 실험장치는 연소 특성상 촉매연소에 의한 1차 연소와 이후 발생되어지는 2차 화염연소가 동시에 발생됨으로 1, 2차 연소가 진행되어지는 부분에서의 온도 분포 및 가스조성의 측정은 전체 시스템의 연소 특성을 이해하는데 가장 중요한 설계인자가 될 수 있다. 그러므로 본 실험 장치의 구성에 있어서 이러한 영역에서는 위의 Fig 3에서 보는 것과 같이 열전대를 집중, 차등 배열하여 온도분포를 측정하였다. 본 실험 장치의 특성상 촉매연소와 화염연소가 이루어지는 곳에서는 고온에서 측정이 가능한 R-Type 열전대를 사용하여 화염 모양 및 화염의 길이를 예측하기 위해 반경 방향으로 15mm 간격으로 열전대를 배치하여 온도를 측정하였다.

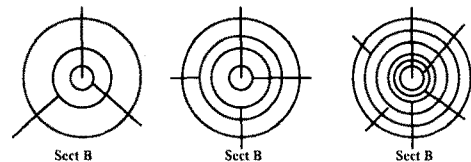


Fig. 3 가스 및 하니컴 촉매의 온도 측정을 위한 열전대 위치

연소기 내부는 고온일 뿐 아니라 약 10kg/cm² 정도로 고압이므로 열전대를 보호하는 장치로 인

코넬 튜브를 이용하여 열전대를 이 튜브에 삽입하였다. 이 때 튜브의 크기를 열전대보다 약간 크게 설정하여 유격을 둠으로서 각각의 열전대가 설치되어 있는 곳에서 가스를 채취하여 온도와 함께 분석하였다.

촉매 후단 배기구는 연소기의 끝단에 위치하며, 압력 조절 밸브를 설치하여 연소기 내부압을 자동으로 조절할 수 있도록 하였다. 밸브는 2-way globe control valve로 크기는 1" 이고 조절 가능한 온도 범위는 600 - 800°C 이하이다. 이 밸브의 자동 조절 기능은 압력조절센서에 의해 제어되어진다.

촉매연소(1차연소)와 화염연소(2차연소)를 통해 최종적으로 배출되어지는 배기가스와 화염의 형상 및 길이 그리고 화염 연소에 소모되어진 연료량을 분석하기 위하여 각각의 열전대 튜브에서 채취한 연소가스의 압력은 실제 분석할 수 있는 분석 장치의 압력 한도보다 크므로 중간에 Regulator를 설치하여 배기가스를 적정 압력으로 낮춘 다음에 sample conditioner에서 포집하여 분석 장치로 유입시켰다. 이렇게 얻어진 배기가스 중 NO_x 측정에는 화학발광법(Thermo Environmental Inc. Model 42H), CO와 CO₂ 측정에는 NDIR 검출기법(HORIVA, FIA 510), THC 측정에는 FID 검출기법(HORIVA, FIA 510)을 사용하였다.

연소기에 사용되어진 촉매의 지지체는 지름이 30 mm이고, 길이가 15 mm인 세라믹 재질을 가지는 Cordierite(300 cell/in²)의 원형 하니컴을 사용하였고, 촉매로는 앞단에는 팔라듐촉매, 뒷단에는 팔라듐/백금 이원촉매를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig 4는 유속변화에 따른 촉매끝단과 연소기 최종 배기가스의 연소 전환율을 나타낸 것이다. 농도는 2.75vol%, 예열온도는 400°C의 조건에서 실험한 실시하였다. 이론적으로 CST 연소법에서 촉매층에서 연소 전환율은 약 20 ~ 40%정도이다. 유속이 6.4 ~ 10.7m/s에서는 알맞은 연소현상을 보여주고 있으나, 4.3m/s의 경우 50%로 다소 높은 연소 전환율을 보였다. 이것은 촉매층의 온도 상승을 유발하여 촉매층의 열손실의 원인이 된다. 전체적으로 유속이 증가함에 따라 촉매끝단의 전환율은 감소하지만, 최종 연소 전환율은 증가하는 것으로 나왔다.

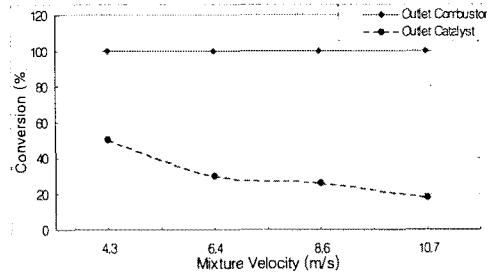


Figure 4 Comparison of conversion at the outlet catalyst and the outlet combustor ; fuel-air ratio : 2.75 vol% , pre-heater temperature : 400°C

Fig 5는 혼합가스의 유속변화에 따른 화염 연소실의 온도 분포를 나타낸 것이다. 유속이 4.3m/s의 경우를 제외하고는 촉매층의 끝단 온도가 950°C이하로 촉매의 열충격으로 인한 손실을 막을 수 있었다. 유속이 6.4m/s에서 10.7m/s로 증가함에 따라 촉매층 끝단의 온도가 921°C에서 877°C로 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 fig 4에서 본 것과 같이 유속이 증가함에 따라 촉매층에서의 연료의 산화된 양이 작아지기 때문이다. 하지만 화염 연소실에서의 온도분포와는 반대의 현상을 보였다. 즉 유속의 증가에 따라 연소실에서의 온도는 증가하는 경향을 보였다. 비록 화염 연소실의 자기 착화를 위한 예열온도가 유속이 감소함에 따라 높으나, 유속이 증가함에 따라 화염 연소실로 들어가는 미연가스의 양이 많아져 화염 연소실의 농도가 증가하게 된다. 따라서 유속의 증가에 따라 연소실내의 혼합가스농도가 높아지게 되고, 화염 연소실로 보내어지는 열량이 많아지게 되므로 온도 또한 높게 되는 것으로 판단된다.

유속은 화염의 형성위치에도 영향을 미치고 있다. Fig 5에 나타나 있듯이 유속이 6.4m/s에서 10.7m/s로 증가함에 따라 온도의 급격한 상승위치가 촉매층과 조금씩 멀어짐을 알 수 있다. 즉 화염 연소실에서의 자기착화에 의한 생겨난 화염의 위치가 촉매층과 멀어진 지점에 형성되었음을 알 수 있다. 화염의 위치는 온도분포와 연소기 끝단에 설치되어 있는 site glass를 통해 관찰한 결과 촉매 끝단에서 약 50 ~ 120mm지점에서

형성되었음을 알 수 있었다.

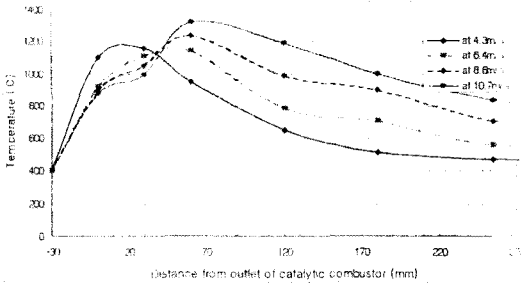


Figure 5 Temperature distributions in the catalytic combustor as a function of mixture velocity; fuel-air ratio : 2.75 vol%, pre-heater temperature : 400°C

Fig 6은 연소기의 길이방향에 따른 CO와 THC의 분포를 나타낸 것이다. CO의 경우 화염 형성지점으로 판단되는 50~120mm지점에서 급격하게 감소하는 경향을 보이며, 330mm지점을 지나면서 모두 산화되어 0ppm으로 떨어졌다.

CO의 발생량은 유속이 빠를수록 많이 발생하는 경향을 보였다. 0mm지점에서의 발생량을 보면 유속이 10.7m/s일 경우 292ppm이 발생하였으나, 6.4m/s의 경우 196ppm으로 약 100ppm 정도 차이가 난다. 이것은 촉매를 나온 혼합가스의 온도가 유속이 증가할수록 낮아 생겨난 불완전 연소로 인해서 많이 발생한 것으로 판단된다.

하지만 50 ~ 120mm지점에서의 CO감소량은 유속이 빠를수록 큰 경향을 보였다. 10.7m/s의 경우 190ppm정도가 감소한 반면, 6.4m/s의 경우 100ppm정도 감소한 것으로 나타났다. 이것은 유속이 증가할수록 화염 온도가 높기 때문에 더 많은 양이 산화된 것으로 사료된다.

THC의 경우도 CO와 마찬가지로 50~120mm 지점에서 급격한 감소를 보이며, 120mm를 지나면서 97%이상이 산화된 것으로 나타났으며, 330mm를 지나면서 모두 산화되어 0ppm으로 떨어졌다. 유속이 증가할수록 THC의 양이 많이 측정되었다. 이것은 앞에서 설명했듯이 유속이 증가할수록 촉매층 내에서 산화된 양이 적기 때문이다. 하지만 CO의 경우와는 달리 50~120mm 지점에서 산화하는 비율이 유속이 증가할수록 낮았

다. 6.4m/s의 경우 30mm지점에서 측정된 THC가 60mm에서 90%정도가 산화된 반면, 10.7m/s의 경우는 54%정도가 산화되었고, 120mm지점에서 60mm지점에서 측정된 양의 97%정도가 산화되었다. 이것은 유속이 증가할수록 화염의 분포가 더 길다는 것을 알 수 있다.

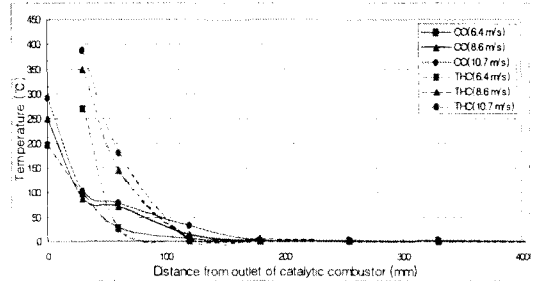


Figure 6 CO and THC emissions in the catalytic combustor as a function of mixture velocity; fuel-air ratio : 2.75 vol%, pre-heater temperature : 400°C

Fig 7의 (a), (b)는 촉매끝단에서 60, 120mm지점에서의 온도분포에 대해 나타낸 것이다. 전체적으로 연소기 벽면으로 갈수록 온도가 낮아지는 경향을 보이고 있다.

60mm부터는 유속이 증가할수록 온도가 높게 나왔다. 즉 유속이 증가할수록 화염의 온도가 높고, 화염의 길이 또한 길게 나타났다. 60mm지점에서 6.4 ~ 10.7m/s의 유속에서는 반경방향 15mm와, 30mm에서 벽면사이의 온도감소가 급격하다. 이것은 반경방향 15 ~ 30mm사이에 재순환 영역이 존재하는 것으로 판단된다. 즉 재순환 영역이 형성되어지는 부분에서 낮은 온도 분포를 보이고 있다. 이것은 재순환 영역에서는 외부와 재순환 영역 내부와의 물질 전달이 잘 이루어지지 않아 발생하는 현상으로 판단되어 진다.

120mm부분은 벽면으로 갈수록 온도변화가 작고 일정하다. 즉 재순환 영역이 약해져서 안정된 속도가 나타나는 부분으로 판단된다.

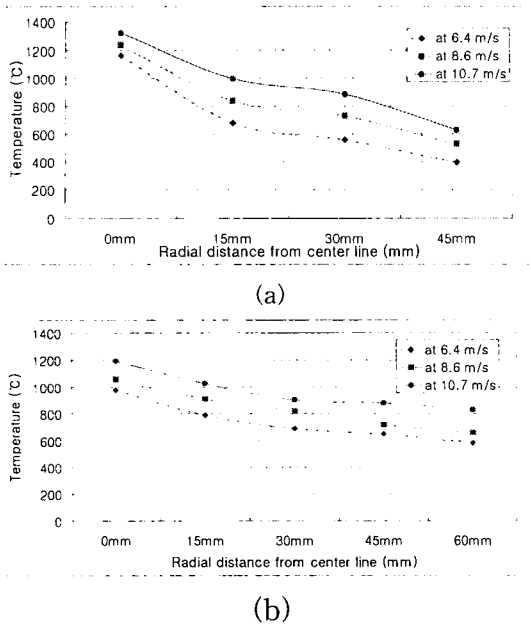


Figure 7 The temperature profiles in the catalytic combustor as a function of mixture velocity; fuel-air ratio : 2.75 vol%, pre-heater temperature : 400°C axial distance: (a) 60mm,(b) 120mm

Fig 8은 촉매 끝단에서 60, 120mm지점에서 반경방향으로의 NOx 성분을 분석한 것이다.

60mm지점은 가운데 부분보다 벽면에서의 발생량이 적었다. 15mm지점까지 급격하게 감소하다가 다시 벽면으로 갈수록 조금 증가하는 경향을 보였다. 하지만 유속이 6.4m/s의 경우는 벽면으로 갈수록 일정한 경향을 보이며, 8.6m/s와 10.7m/s의 경우보다 발생량이 10ppm정도 적게 측정되었다. 이처럼 벽면으로 갈수록 감소하다가 다시 증가하는 원인은 재순환에 의해 후단의 NOx가 앞쪽으로 순환된 것으로 판단된다.

마지막 120mm지점은 큰 변화 없이 벽면으로 갈수록 비슷한 경향을 보였다. 6.4m/s의 경우 가운데 부분(0mm)보다 벽면에서 1ppm정도 증가하였으나 매우 일정하게 증가하는 경향을 보였다. 하지만 8.6m/s와 10.7m/s의 경우 약 9ppm 정도 많이 발생하였으며, 15mm지점까지 감소하는 경향을 보이다가 벽면으로 갈수록 다시 조금씩 증가하는 경향을 보였다.

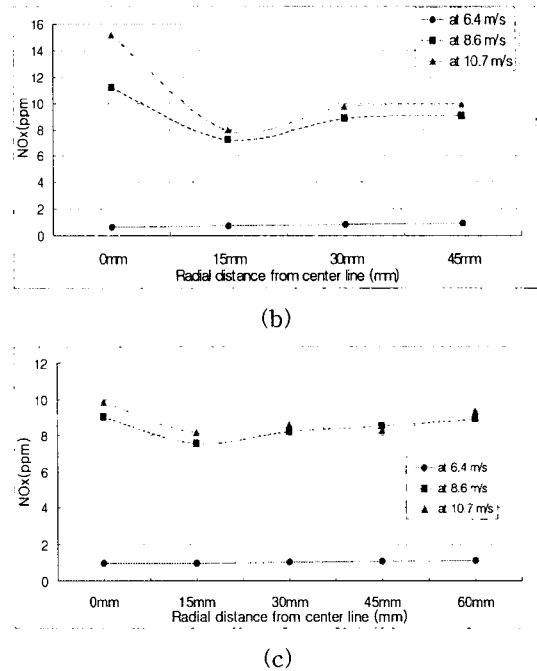


Figure 8 The NOx emissions profiles in the catalytic combustor as a function of mixture velocity; fuel-air ratio : 2.75 vol%, pre-heater temperature : 400°C axial distance: (a) 60mm,(b) 120mm

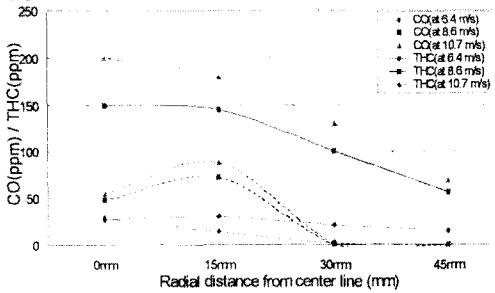
Fig 9는 촉매 끝단에서 60, 120mm지점에서의 반경방향 CO, THC성분을 나타낸 것이다.

60mm지점에서 CO는 15mm지점까지는 조금 증가하는 경향을 보이다 다시 벽면으로 갈수록 급격하게 감소하는 경향을 보였다. 벽면에서는 모두 0ppm으로 측정되었다. CO와 THC의 경우도 산화된 배기가스가 재순환에 의해 벽면으로 유입되어 농도가 낮은 것으로 판단된다. Fig 6에 나와 있듯이 촉매 끝단에서 120mm이후부터 CO와 THC는 대부분 산화된다. 이렇게 산화된 배기가스가 60mm지점의 벽면으로 순환된 것이다.

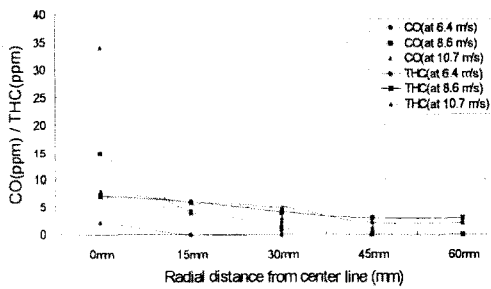
마지막 촉매 끝단에서 120mm지점을 보면 CO와 THC는 모두 벽면으로 갈수록 감소하는 경향을 보였다. 특히 CO의 경우 8.6m/s와 10.7m/s의 경우 15mm지점으로 갈수록 급격한 감소를 보이다가 벽면에서 모두 0 ~ 1ppm으로 측정되었다. THC의 경우는 60mm에서의 경향과 조금 다르게 벽면으로 갈수록 증가하는 부분이 없이 전체적으로 감소하는 경향을 보이며, 벽면

에서 2 ~ 3ppm 정도로 측정되었다.

전체적으로 CO와 THC는 벽면으로 갈수록 감소하는 경향을 보였으며, 유속이 빠를수록 많이 발생하였으며, 감소율도 크게 나왔다



(a)



(b)

Figure 9 The CO and THC emissions profiles in the catalytic combustor as a function of mixture velocity; fuel-air ratio : 2.75 vol%, pre-heater temperature : 400°C axial distance: (a) 60mm, (b) 120mm

Fig 10은 화염 연소실의 압력 증가에 따른 연소실 길이방향 온도 분포를 나타낸 것이다. 압력의 증가에 따라 촉매끝단의 온도가 높아지고 있다. 즉 압력이 올라감에 따라 촉매층을 지나가는 혼합가스의 유속이 감소하게 되고, 촉매층 내에서 연소하는 연료의 양이 많아짐에 따라 촉매끝단의 온도가 올라간 것으로 판단된다. 촉매층의 온도증가로 인해 화염대가 더 가까운 곳에 형성되어 졌음을 알 수 있다.

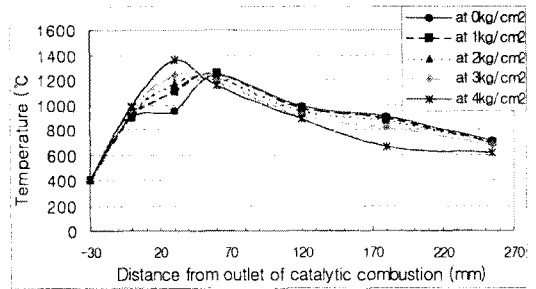
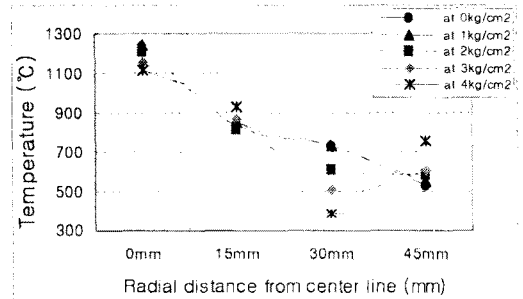
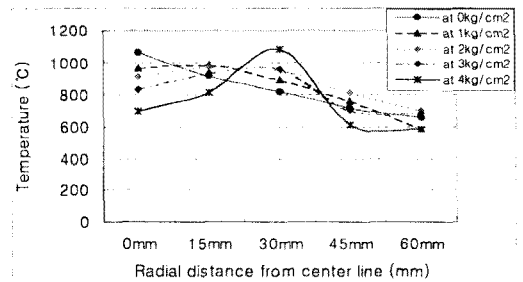


Figure 10 Temperature distributions in the catalytic combustor as a function of pressure ; fuel-air ratio : 2.75 vol%, pre-heater temperature : 400°C



(a)



(b)

Figure 11 The temperature profiles in the catalytic combustor as a function of pressure; fuel-air ratio : 2.75 vol%, pre-heater temperature : 400°C axial distance: (a) 60mm, (b) 120mm

Fig 11은 촉매 끝단에서 60, 120mm의 위치에서 반경방향의 온도분포를 나타낸 것이다. 전체적으로 가운데 부분(0mm)보다 벽면의 온도가 감소하고 있다. 하지만 압력이 증가할수록 화염이 반경방향으로 퍼져나가고 있다는 것을 알

수있다.

먼저 60mm지점에서 압력이 증가하면, 반경방향으로 온도가 감소하다가 30mm이후에 온도가 다시 증가한다는 것을 알 수 있다. 이런 현상은 압력이 증가할수록 더욱 뚜렷이 나타난다.

120mm지점에서도 반경방향으로 갈수록 온도가 감소하는 경향을 보이지만, 압력이 증가할수록 반경방향 30mm부근에서 온도가 증가하다가 다시 감소하는 경향을 보였다. 즉 화염이 대기압 상태처럼 가운데 부분을 중심으로 앞으로 길게 나가는게 아니라 벽면으로 퍼져나가고 있다는 것을 알 수 있다.

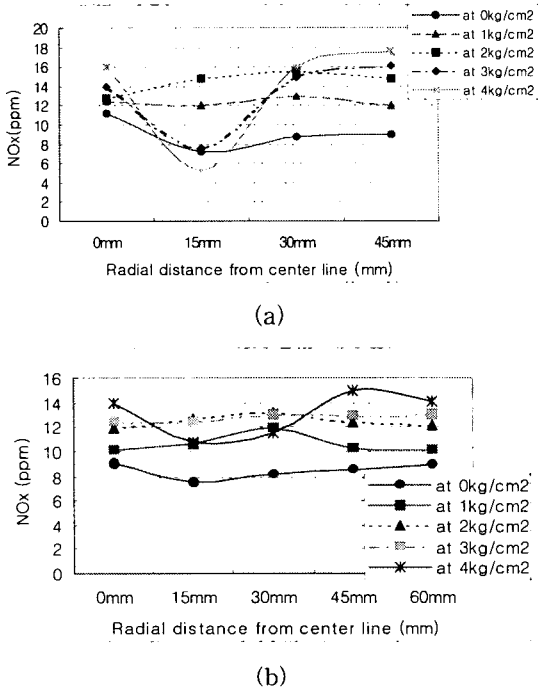


Figure 12 The NOx emissions profiles in the catalytic combustor as a function of pressure; fuel-air ratio : 2.75 vol%, pre-heater temperature : 400°C axial distance: (a) 60mm,(b) 120mm

Fig 12는 촉매 끝단에서 60, 120mm지점에서 반경방향으로의 NOx분포를 나타낸 것이다.

먼저 60mm지점에서 반경방향으로 15mm지점 까지 감소하다가 다시 벽면에서 증가하는 경향을 보였다. 이런 현상은 압력이 증가함에 따라 더욱

뚜렷이 나타났다. 대기압 하에서는 가운데부분 (0mm)과 15mm부분이 3ppm이 차이 나는 반면, 4kg/cm²으로 증가하면 약 10ppm이 차이 난다.

120mm지점에서는 압력이 증가할수록 조금씩 벽면에서 NOx량이 많은 것으로 나타났다. 특히 4kg/cm²에서는 반경방향 15mm로 가면서 급격히 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보였다.

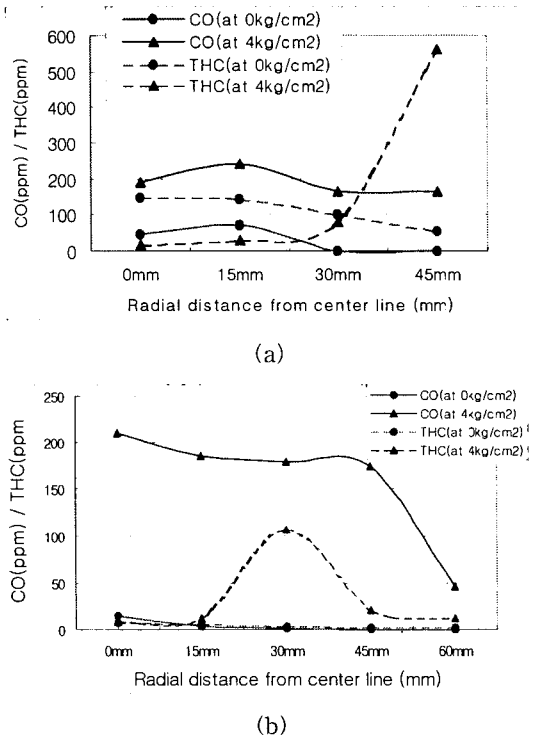


Figure 13 The CO and THC emissions profiles in the catalytic combustor as a function of pressure; fuel-air ratio : 2.75 vol%, pre-heater temperature : 400°C axial distance: (a) 60mm,(b) 120mm

Fig 13은 촉매 끝단에서 60, 120mm지점에서 반경방향으로의 CO, THC의 분포를 나타낸 것이다. 전체적으로 압력이 증가하였을 때 CO와 THC의 양이 많았다.

먼저 60mm지점에서 CO는 벽면으로 갈수록 모두 감소하는 경향을 보인 반면 THC는 4kg/cm²에서 벽면으로 갈수록 급격하게 증가하는 경향을 보였다.

하지만 120mm지점에서는 THC는 압력증가시 벽

면에서 감소하는 경향을 보였다. CO의 경우는 벽면으로 갈수록 조금씩 감소하는 경향을 보였으며, 대기압과 고압(4kg/cm²)에서의 분포경향은 매우 비슷하였다.

4. 결론

가스터빈용 연소기에 적용할 수 있는 CST방식의 2단 고압축매연소기를 제작하여, 팔라듐축매와 팔라듐/백금 이원축매를 축매층에 설치하고 뒷단에는 화염 연소실을 설치하였다. 대기압하에서 화염 연소기내의 화염온도, 배기가스 성분을 측정하였고, 그 자료를 바탕으로 압력을 증가하면서 실험을 하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 유속이 증가할수록 축매끝단의 연소 전환율은 감소하는 반면, 연소기 끝단의 전환율은 증가하는 경향을 보인다.
- 2) 유속이 4.3m/s의 경우 축매 끝단의 온도가 1100℃까지 올라가게 되어 축매의 손실을 가시었다. 전체적으로 유속이 증가할수록 화염의 온도는 증가하고, 화염은 축매층과 먼 지점에서 형성되었다.
- 3) CO와 THC는 유속이 증가할수록 많이 발생하고 화염 형성지역으로 판단되는 축매끝단에서 50 ~ 120mm에서 대부분 산화되었다.
- 4) 축매끝단에서 60mm지점 반경방향으로 온도가 감소하는 경향을 보였으며, 가운데 부분(0mm)와 15mm, 30 ~ 벽면사이의 온도 감소가 크며, 120mm지점은 벽면으로 갈수록 일정한 온도감소를 보였다.
- 5) 60mm지점의 NOx는 벽면으로 갈수록 조금 감소하다가 다시 벽면으로 갈수록 증가하는 경향을 보였다. 120mm지점도 60mm지점과 비슷하게 조금 감소하다가 벽면으로 갈수록 조금씩 감소하는 경향을 보이고 있다.
- 6) CO와 THC는 60, 120mm지점에서 벽면으로 갈수록 감소하는 경향을 보였다.
- 7) 화염 연소기내의 압력이 증가함에 따라 화염 형성지역이 축매끝단과 가까운 지점에 형성되며, 화염 온도 또한 증가하였다.
- 8) 60mm지점에서 반경방향으로 갈수록 온도가 감소하는 경향을 보이고 있으며, 압력이 증가할수록 반경방향 30mm지점의 온도 감소가 더욱 급격하며, 벽면에서 다시 증가하는 경향을 보였다.
- 9) 60mm지점의 NOx는 반경방향 15mm지점까지 감소하다가 다시 벽면으로 갈수록 감소하는 경향을 보이는데, 이런 형상은 압력이 증가할수록 더

욱 뚜렷한 경향을 나타내었다.

10) CO와 THC는 압력이 증가할수록 많이 발생하며, 4kg/cm²에서 THC는 벽면에서 급격하게 증가하였다.

후 기

본 연구는 축매연소연구센터의 지원과 과학기술부 국가지정 연구실 사업의 일환으로 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사를 드립니다.

참고문헌

- [1] 서용석, 강성규, 신현동 (1998) "축매 연소기에서 회박 예혼합기의 연소 특성" 대한기계학회 논문집 Brnjs, pp1688-1690
- [2] 이경원, 강성규 (2001) "가스터빈용 축매연소기를 위한 축매-화염 복합 연소특성 연구"한국연소학회 추계학술대회
- [3] CHoi, I.S., Lee, I. C, et (1987) "A study of the technical measure to counter NOx", KIER, Report NO. KRC-85C-J01
- [4] Zeldovich, Y. B., (1946) Acta physicochimica U.R.S.S.21(4):577
- [5] Dalla Betta, R.A, Schlatter, J. C et (1995) "Application of catalytic combustion technology at industrial gas turbines for ultra-law NOx emissions" ASME, 95-GT65