

촉매를 이용한 모형가스터빈 연소기의 배기후처리 시스템 Emission After-Treatment System of Model Gas Turbine Using Catalyst

이용후 · 이진석 · 배대석 · 이도형

Y. H. Lee, J. S. Lee, D. S. Bae and D. H. Lee

Key Words : Three Way Catalysts(삼원촉매), Excess Air Ratio(공기과잉률), Diffusion Combustor(확산연소기), Emission After Treatment System(배기 후처리시스템)

Abstract : The purpose of this study is to observe the purification characteristics of NOx, CO and HC in various catalysts and excess air ratio conditions. For this purpose, we installed various catalysts on the back stream of the coaxial diffusion burner with swirler. As the result, in the case of NOx, Pt-Rh catalyst shows very high value that is more than 90%-conversion efficiency without the relation with the excess air ratio. After excess air ratio of $\alpha=1.14$, it shows that the conversion efficiencies were more than 80% in the every Pt catalyst in the view of conversion of every exhaust with changing of the excess air ratio.

1. 서 론

최근 들어 선박, 자동차 및 각종 산업용 연소기기에서 연소에 의한 대기오염물질은 심각한 사회문제로 되어 있으며, 이들을 줄이기 위한 기술개발이 시급한 실정이다.

연소에 의한 오염물질을 줄이기 위한 노력은 크게, 연료의 고급화, 연소제어, 배기가스 후처리, 및 촉매 등을 이용한 특수 연소기법의 도입 등으로 구분할 수 있다¹⁾. 이 중에서도 연소공학적 측면에서 효율성과 경제성을 감안하면, 배기가스를 후처리하는 방법이 바람직하다 할 수 있다.

최근 우리나라에서도 자동차분야에서는 천연가스 및 디젤엔진에서의 배기 후처리 시스템에 산화촉매 혹은 삼원촉매(Three Way Catalyst)에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다²⁾. 이들 중에는 모델가스를 제작하여 촉매반응부 전후의 농도를 측정하는 연구, 그리고 엔진의 공연비 변화와 회전수 및 출력 등의 변화에 대한 연구³⁾가 많다. 그러나 각종 산업로, 건조장치 혹은 대형 선박의 굴뚝 등에서는 연소후의 배출물

이 곧바로 촉매체에 닿게 되어, 촉매체의 설계에는 배기 덕트에서의 유동과 촉매체 전후의 공간적인 농도변화의 측정이 반드시 필요하다. 본 연구실에서는 오염물질의 후연소에 관한 연구⁴⁾를 통하여, NOx를 제외한 오염물질의 저감에 상당한 효과가 있음을 이미 밝힌 바 있다.

본 연구에서는 산업용 연소장치의 종합적인 배기 후처리장치의 개발을 위한 기초연구로써, 선회기를 부착한 동축 확산버너의 후류에 Pt, Pd 및 Pt-Rh 등 다양한 촉매를 설치하여, 공기과잉률의 변화에 따른 이들 촉매의 NOx를 포함한 각종 오염물질의 정화특성을 살펴보는 것을 목적으로 하였다.

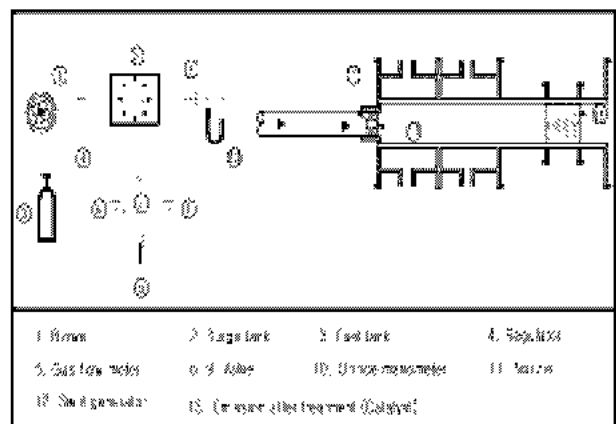


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

접수일 : 2003년 4월 15일
이용후(책임저자) : 부경대학교 대학원 자동차공학과
E-mail : wiztown@hotmail.com, Tel : 051-620-1415
이진석 : 부경대학교 대학원 자동차공학과
배대석, 이도형 : 부경대학교 기계공학과

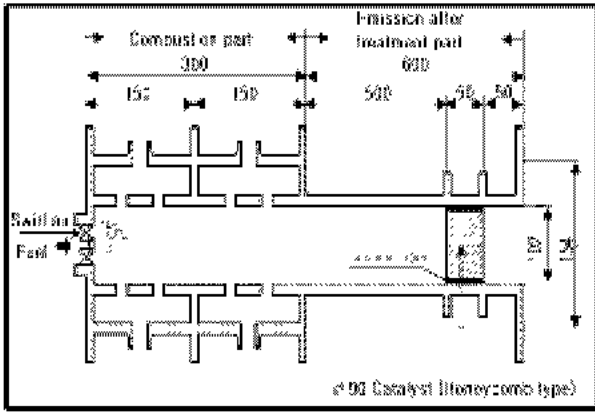


Fig. 2 Detail of gas burner combustor and emission after-treatment system (unit:mm)

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치 및 방법

Fig. 1 은 본 연구에서 사용된 촉매를 이용한 확산 연소기의 배기 후처리 시스템의 실험장치도를 나타낸 것이다.

연소용 공기는 송풍기에서 공급되며 공기압의 안정성을 위해 압력맥동을 최소화하는 서지탱크를 거친 후, 증류유량계(SOKKEN LFE-100B)에 의해 검증된 오리피스 수두를 조절밸브로 조절하여 필요한 공기 유량을 공급한다. 또한 연료는 상용 LPG를 사용하였으며 압력조정기와 가스유량계를 거쳐 연소기에 공급된다.

Fig. 2 는 촉매가 장착된 배기 후처리장치의 상세도이다. 연소기 전체의 길이는 900mm이며, 가스버너는 직경 154mm 케이싱과 직경 102mm의 라이너로 구분된다. 이 때 공기는 내경 52mm의 내측원관으로 유입되고 연료는 노즐내경 7mm 분공 8개를 통하여 분사각 30°로 연소실에 분사된다. 선회기(Swirlor)는 축방향으로 선회각 30°로 설치하여 공기와 연료의 혼합을 촉진하기 위해 공기를 선회(S=0.42)시켰다.

배기 후처리 시스템에서 배기가스를 반응시키기 위한 촉매는 넓고 안정된 담체에 분산시키지 않으면 안 되므로, 촉매 지지체는 고부하 연소기에 적합하도록 표면적이 크고 압력손실이 적은 사각형 셀형상을 갖는 Honeycomb type을 사용하였다.

직경 D=90mm 길이 L=50mm인 촉매를 가스버너 후류의 덕트에 설치하여 촉매주위에 연소기벽과의 접촉을 통한 열전달을 방지하기 위해 촉매와 연소기덕트 사이에 세라믹 단열재를 감았다.

촉매물질로는 백금(Pt), 팔라듐(Pd) 그리고 백금-로듐(Pt-Rh)이 담지되어 있는 삼원촉매를 사용하였으며, γ - Al_2O_3 로 워시코트한 것이다.

본 연구의 온도 측정에는 R-type, 세션 직경 0.5mm 재질 Pt/Pt-Rh 13%의 수냉식 열전대를 사용하였으며, NOx측정은 화학발광식 분석법을 이용한 NOx분석기(SHIMADZU NOA-7000)를 사용하였다⁵⁾. 그 외 각종 화학종 농도(CO, CO₂, HC, O₂)는 비분산 적외선 분석(NDIR)방식을 이용한 가스농도분석기(I/M 2000, SHIN SUNG)를 사용하여 각종 농도를 온도와 동일한 조건에서 측정하였다. 샘플가스의 채취를 위해서는 흡입직경 1mm로 하였으며 흡입도중 재반응을 막기 위해 3중 수냉식 프로브를 사용하였다.

한편, 촉매체 전후의 온도 및 농도측정을 위해서는 프로브가 촉매반응에 영향을 주지 않아야 한다. 따라서 촉매 표면에서 25mm 상류 및 하류지점에 흡입 프로브 직경과 거의 동일한 홀을 통해 측면에서 측정하였으며, 측정 프로브는 가스버너의 상류방향을 향하도록 농도 프로브 흡입부를 90°각을 주어, 연소가스의 흡입력의 장애를 극복하고 공간 분해능이 좋게 제작하여 측정하였다.

2.2 실험조건

Table 1은 본 실험에서 사용한 촉매조건으로써 촉매의 내열한계온도는 800°C~1000°C이다. 촉매의 체적 및 셀밀도는 일정하며 촉매물질에 따라 3가지를 사용하였다.

Table 1 Specification of sample catalyst

Item	Precious metal	Precious metal loading rate(g/pe)	Volume (m ³)	Cell number (cell/in ²)
C ₁	Pd	2.0	0.34	300
C ₂	Pt	2.0	0.34	300
C ₃	Pt/Rh	0.283/0.057	0.34	300

Table 2 Experimental conditions

	Q _f (l/sec)	Q _a (l/sec)	u	S · V (hr ⁻¹)
Flame 1	0.1	2.05	0.86	22832
Flame 2		2.22	0.93	24637
Flame 3		2.38	1.00	26357
Flame 4		2.56	1.08	28248
Flame 5		2.73	1.14	30053
Flame 6		2.99	1.26	32814

실험조건은 Table 2와 같이 설정하였으며, 연료는 0.2kg/cm²의 일정한 압력하에서 연료유량(Q_f) 0.1 l/sec로 일정하게 하여 공기과잉율(α) 변화에 따라 배기 덕트에 설치된 배기 후처리 시스템의 정화특성에 관하여 고찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 Table 2에 나타난 Flame 3($\alpha=1.0$)의 조건에서 C₂(Pt)에서의 촉매 입·출구부의 반경방향에 대한 CO, CO₂, O₂의 농도분포를 나타내고 있다. 전체적으로 반경방향에 대해 CO와 O₂의 농도가 촉매 출구부에서 감소하고 CO₂가 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 촉매 내에서 CO가 산화반응을 하고 있기 때문이다.

Fig. 4는 Fig. 3과 동일한 조건으로서 HC와 NO_x의 반경방향에 대한 농도분포를 나타내고 있다. 촉매 입출구의 반경방향에 대해 출구부에서 HC, NO_x의 농도가 감소하는 것을 볼 수가 있다.

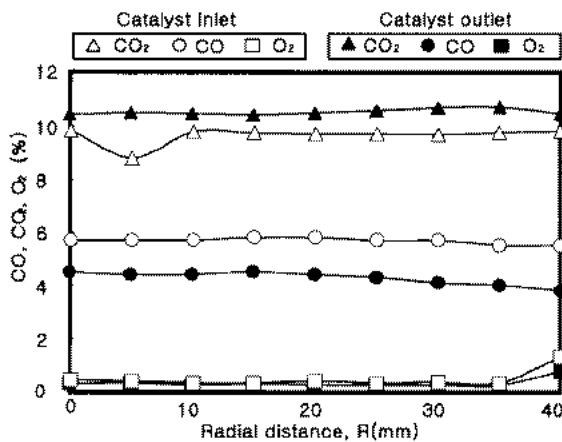


Fig. 3 Distributions of CO, CO₂ and O₂ concentration at catalyst inlet and outlet ($\alpha=1.0$)

HC의 감소는 촉매체 내에서 산화반응에 의해 감소하는 것이고, NO_x는 환원반응에 의해 감소하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 반응은 촉매체내에서 CO와 HC의 산화 및 NO_x의 환원반응이 동시에 일어나고 있기 때문이다.

Fig. 5는 Flame 3의 조건에서 촉매체 입출구부에서의 반경방향에 대한 온도분포를 나타내고 있다.

촉매체 입구부의 온도가 출구부의 온도보다 높게 나타나는 것을 볼 수 있으며, 연소기 벽면부근에서

온도가 더욱 높게 나타난다. 이는 촉매체 입구부에서 복사열 및 유동저항의 발생으로 인해 온도가 촉매체 출구보다 입구부가 높기 때문으로 사료된다.

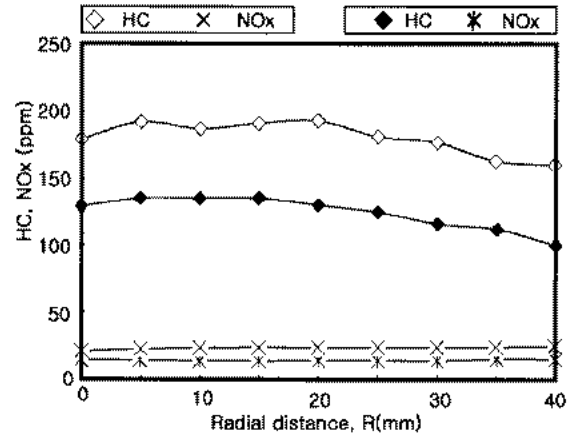


Fig. 4 Distributions of HC and NO_x concentration at catalyst inlet and outlet ($\alpha=1.0$)

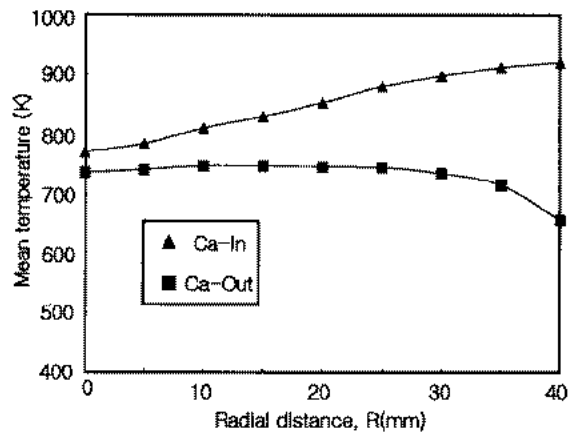


Fig. 5 Distributions of mean temperature at catalyst inlet and outlet ($\alpha=1.0$)

Fig. 6과 Fig. 7은 공기과잉율의 변화에 따른 C₁, C₂ 및 C₃ 촉매의 입·출구부에서의 HC와 CO의 평균 농도를 나타내고 있다. 대부분 촉매 출구부의 HC와 CO의 농도가 감소하는 경향을 볼 수 있다. 이것은 HC와 CO가 촉매체 내에서 활발한 산화반응을 통해 그 양이 감소하기 때문이다.

그러나 Fig. 6의 Flame 1($\alpha=0.86$)의 조건에서 HC를 보면 Pt를 제외한 다른(Pd, Pt-Rh)촉매에서는 출구부의 HC가 오히려 증가하였다.

이와 같이 공기가 부족한 조건에서는 촉매의 산화반응이 잘 일어나지 않는 것으로 사료된다. 하지만 이러한 조건에서도 백금(Pt)촉매의 경우는 그 양이

감소한다.

이것은 백금(Pt)촉매가 연료과농의 조건($\alpha=0.86$)에서도 백금(Pt)촉매의 산화활성도가 활발함을 말해준다.

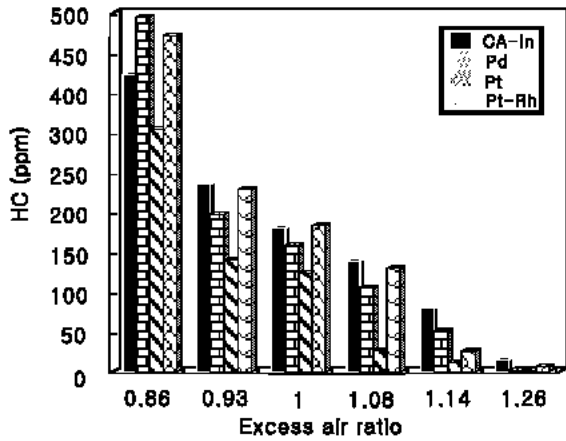


Fig 6. Distributions of HC average concentration at catalyst inlet and outlet of Flame 1 to 6

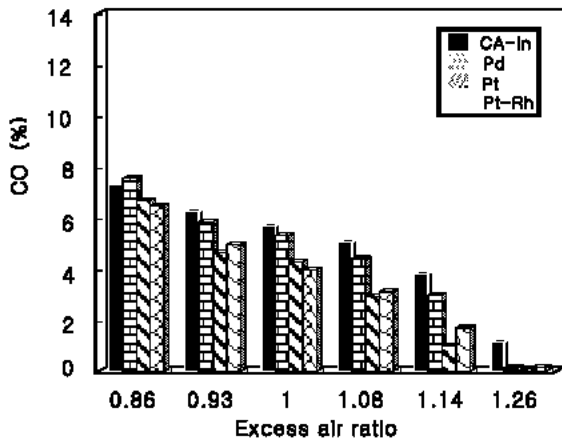


Fig. 7 Distributions of CO average concentration at catalyst inlet and outlet of Flame 1 to 6

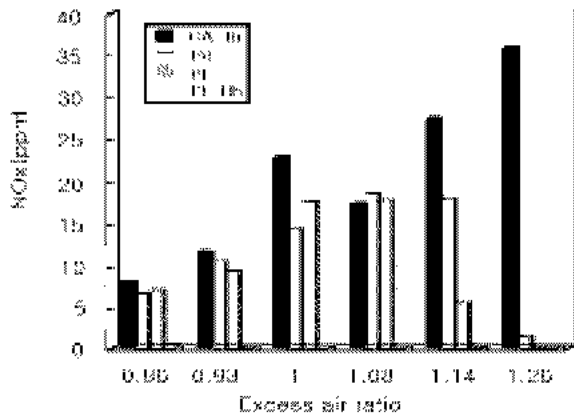


Fig. 8 Distributions of NOx average concentration at catalyst inlet and outlet of Flame 1 to 6

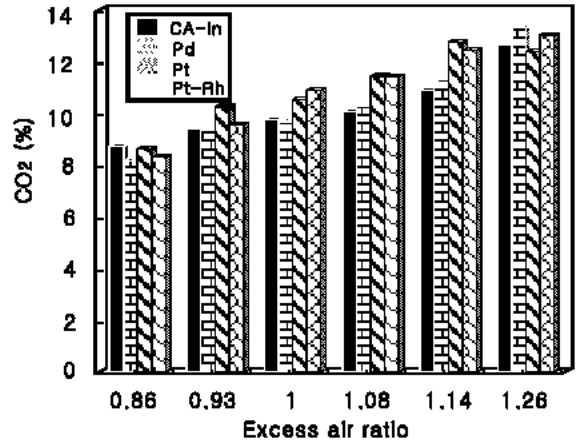


Fig. 9 Distribution of CO₂ average concentration at catalyst inlet and outlet at Flame 1 to 6

Fig. 8은 공기과잉율의 변화에 따른 C₁(Pt), C₂(Pd), C₃(Pt-Rh)촉매 입·출구부에서의 NOx의 평균농도를 나타내고 있다. 촉매 입구부에서 공기과잉율이 증가할수록 NOx의 양이 증가하고 있으나 C₃(Pt-Rh)촉매의 경우 공기과잉율에 관계없이 NOx가 촉매 출구부에서 거의 나타나지 않음을 볼 수가 있다. 특히 Flame 6($\alpha=1.26$)에서는 NOx의 양이 0.3ppm 이하로 거의 발생하지 않았다.

Fig. 9는 공기과잉율의 변화에 따른 촉매 입·출구부에서의 CO₂의 평균농도를 나타내고 있다. Flame 1($\alpha=0.86$)에서는 CO₂의 양이 다소 감소하는데 이것은 Fig. 6과 Fig. 7에서 HC와 CO의 양이 촉매 출구부에서 다소 증가하는 현상과 일치하며, 이 조건에서는 공기부족으로 인해 산화·환원반응이 이루어지지 않고 있음을 알 수 있다.

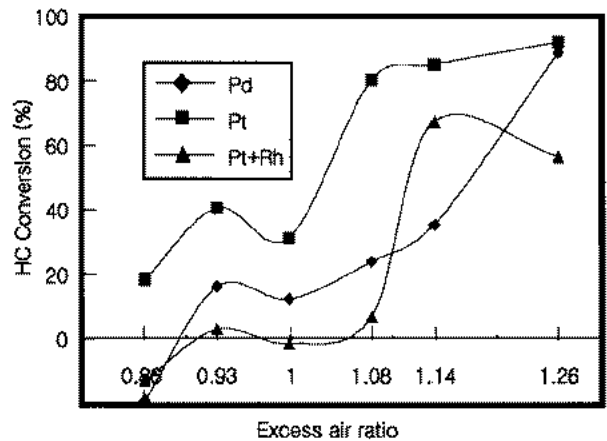


Fig. 10 HC Average conversion efficiency of the excess air ratio for each catalysts

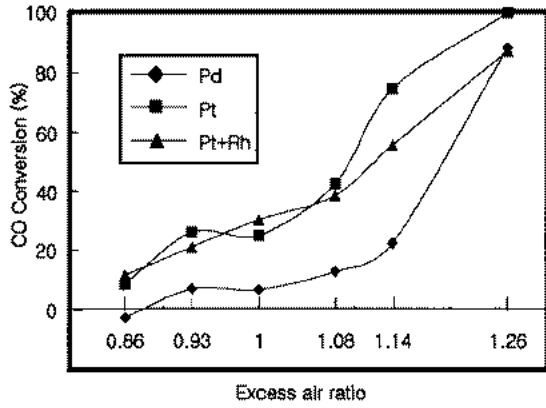


Fig. 11 CO Average conversion efficiency of the excess air ratio for each catalysts

Fig. 10은 공기과잉율 변화에 따른 각각의 촉매에서 HC의 정화율을 나타낸 것이다. 공기과잉율 $\alpha=1.0$ 부근에서는 전 촉매에 대해 정화율이 다소 감소하는 것을 볼 수 있으며, 공기 과잉율이 증가할수록 모든 촉매에서 정화율이 상승하는 경향을 볼 수가 있다. 하지만 백금-로듐(Pt-Rh)촉매의 경우는 부분적으로 불안정한 상태를 보이고 있다.

Fig. 11은 공기과잉율 변화에 따른 CO의 정화율을 나타내고 있다. CO도 역시 HC와 동일하게 공기과잉율 $\alpha=1$ 부근에서 정화율이 다소 감소하고 있으며 또한 공기과잉율이 증가할수록 정화율은 증가한다. 이것은 산화반응에서 우선적으로 반응하는 CO의 산화반응을 통한 생성열이 HC의 산화반응에 도움을 주기 때문으로 사료된다.

Fig. 10과 Fig. 11에서 팔라듐(Pd)촉매의 정화율이 가장 낮으며 백금(Pt)촉매의 정화율이 가장 좋은 것을 알 수 있다.

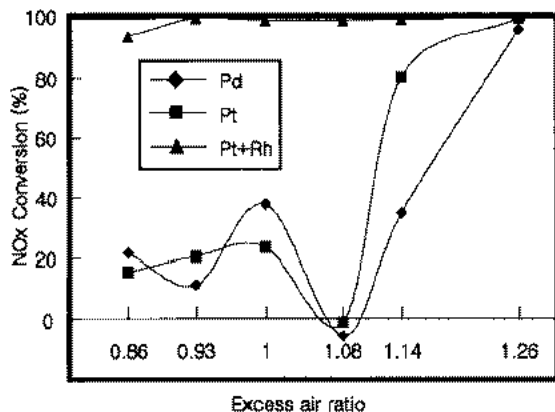


Fig. 12 NOx Average conversion efficiency of the excess air ratio for each catalysts

Fig. 13은 공기과잉율의 변화에 따른 각각의 촉매에서의 NOx의 정화율을 나타내고 있다. 백금-로듐(Pt-Rh)촉매의 경우, 공기과잉율의 변화에 관계없이 90%이상의 정화율을 나타내고 있으며 백금-로듐(Pt-Rh)촉매가 환원반응이 매우 좋음을 알 수 있다. 백금(Pt)촉매의 경우 공기과잉율 $\alpha=1.14$ 부터는 정화율이 80%이상을 나타내고 있다. 다만, 공기과잉율 $\alpha=1.08$ 에서는 백금(Pt)과 팔라듐(Pd)촉매의 경우 정화율이 음의 값을 보이는 것은 흥미롭다.

4. 결 론

모형가스터빈 연소기의 배기 후처리시스템에서 공기과잉율과 촉매종류에 따른 배기가스의 정화특성을 조사한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 공기과잉율이 CO와 HC의 저감효과에 영향을 미친다. 본 실험조건에서는 공기과잉율 $\alpha=1.08$ 이상에서 촉매종류와 관계없이 고른 분포의 저감효과를 얻었다.
2. NOx의 경우 공기과잉율에 관계없이 백금-로듐(Pt-Rh)촉매가 정화율이 90% 이상의 아주 높은 값을 나타내었다.
3. 공기과잉율 변화에 따른 모든 배출물의 정화의 관점에서 보면, 공기과잉율 $\alpha=1.14$ 이상에서는 백금(Pt)촉매가 80%이상의 정화율을 보이고 있다.

공기과잉율이 높은 산업용 확산버너에서 산화·환원반응을 통한 각종 배출물의 저감효과를 위한 본 연구조건에서는 백금촉매가 우수한 저감효과를 가져왔으며 앞으로 더욱 다양한 연소영역에서 촉매물질의 변화와 촉매체적의 변화들에 따른 촉매물질의 개발연구가 필요할 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 2000학년도 부경대학교 기성회 학술연구비 지원에 의하여 수행되었음을 밝힙니다.

참고문헌

1. 日本機械學會 編, 1999, “燃焼の設計(-理論と實際-)”, オーム社, pp. 111~124, 182~197.

2. T. S. Kim, 1999, "A Theoretical Study on Exhaust Gas Reduction by Oxidation Catalyst in Diesel Engine" SAE 97370082.
3. 최병철, 전종우, 임명택, 김영길, 1977, "공연비 변화에 따른 천연가스 자동차용 촉매의 정화 특성", 한국자동차공학회, 추계학술대회 논문집, pp.1071~1076.
4. 강인구, 김규성, 이우섭, 이도형, 1999, "동축확산형 가스버너의 선화 강도 및 공기과잉율변화에 따른 연소특성", 한국동력기계학회 추계학술대회 논문집, pp.27~33.
5. 김규성, 이우섭, 강인구, 이도형, 1999, "동축확산연소기의 화염구조와 NOx 분포에 관한 연구", 한국연소학회 논문집, Vol. 4, No. 2, pp.35~41.
6. 광영홍, 임명택, 최병철, 1998, "자동차용 배기정화 촉매의 열화특성 연구", 한국자동차공학회 추계학술대회 논문집, pp.210~215.
7. 김상도, 2001, "고기능 촉매필터 기술개발 동향", ETIS 기술분석지, Vol. 15, 한국에너지기술연구소.