

<기술논문>

저NOx형 하니컴 촉매버너의 개발

서용석* · 박병식** · 강성규***

(1996년 12월 3일 접수)

Development of a Low NOx Burner with Honeycomb Catalyst

Yong Seog Seo, Byung Sik Park and Sung Kyu Kang

Key Words : Catalytic Combustion(촉매연소), Catalyst(촉매), NOx(질소산화물), Catalytic Burner(촉매버너)

Abstract

A catalytic burner was studied which can be used as a heater operated in medium temperature. Noble metal catalysts (Pd/NiO) were used, which were supported on alumina washcoated honeycomb. The maximum heat-resisting temperature of the catalyst is about 900°C. Combustion efficiency of the catalytic burner reached more than 99.5 % at the excess air ratio above 1.25. NOx emissions were lower than 1.0 ppm at all operation conditions. The operation condition for a stable catalytic combustion was obtained. It was dependent on the catalyst thickness. The 30 mm thick catalyst showed the widest stable catalytic combustion region. Stable catalytic combustion region of 30 mm thick catalyst was the operation condition of excess air ratio 1.25 - 1.75 and heat flux 7 - 14 kcal/h·cm².

1. 서 론

촉매연소란 가스연료와 산화제(공기)가 촉매에 각각 흡착되어, 촉매 표면에서 산화반응이 일어난 후, 반응물이 촉매표면으로부터 탈착하는 것이 연속적으로 일어나는 현상이다. 촉매연소를 이용한 연소기는 초기에는 주로 열부하가 작은 난방용 기기에 이용되었다.⁽¹⁾ 그 이후 촉매연소 기술은 지속적으로 발전하여 최근에는 보일러나 가스터빈 등과 같은 고부하 연소기에 촉매연소를 적용하여 저NOx연소기를 개발하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.^(2,3)

촉매연소는 연소범위(flammability limit)가 넓

어서 화염연소로는 연소가 불가능한 희박가스에서도 연소가 가능하다. 혼합기의 농도를 초희박 조건으로 하여 연소시키면 혼합기의 이론 단열 화염온도가 낮아져서 Thermal NOx가 발생하지 않는 낮은 온도에서도 연소가 가능하여 초 저NOx 연소기의 개발이 가능하다.^(4,5)

그리고 촉매연소는 연소개시 온도(Light-off temperature)가 화염연소 보다 훨씬 낮다. 예를 들어 메탄(CH₄)연소에 있어서, 화염연소인 경우에는 점화온도가 대략 615°C이고, 촉매연소인 경우에는 사용된 촉매의 종류에 따라 다르지만 대략 350-450°C이다. 이것은 촉매연소 시에 활성화에너지가 화염연소의 경우보다 매우 낮기 때문이다. 따라서 촉매연소를 이용할 경우에 저온에서도 안정적인 연소가 가능하다.

촉매연소는 공기와 연료의 혼합방식 및 혼합비에 따라서 확산식, 예혼합식, 초희박 예혼합식으로

*회원, 한국에너지기술연구소 촉매연소연구팀

**회원, 한국에너지기술연구소 보일러연구팀

***한국에너지기술연구소 촉매연소연구팀

구분된다.⁽⁶⁾ 본 연구는 연료와 공기를 예혼합한 혼합기를 촉매층에 통과시켜 촉매의 표면반응에 의해서 연소를 완료하는 예혼합식에 관한 것이다.

본 연구에서 개발하는 예혼합식 촉매버너는 가열 공정용이나 건조 공정용 연소기로 이용할 수 있다. 또한 실내 및 대형 공간의 복사 난방기로도 이용이 가능하다. 본 촉매버너는 기존의 Shwank버너, 적외선 버너 등과 같은 표면연소 버너가 사용되는 분야에 모두 대체 이용될 수 있다.

촉매버너는 앞에서 기술한 바와 같이 NOx의 발생을 근본적으로 해결할 수 있으며, 또한 기존의 표면연소 버너에 비하여 복사효율이 더 우수하다.^(7,8) 그리고 촉매버너는 버너 표면에 화염이 형성되지 않기 때문에 사용하고자 하는 목적에 적합하도록 버너의 표면온도를 조절하는 것이 가능하므로 가열 공정이나 건조 공정에서 근접 가열이 가능하여 열전달 효율이 우수⁽⁹⁾하다.

본 연구에서는 하니컴에 귀금속(Pd/NiO)을 담지한 촉매를 사용하였다. 촉매버너를 개발하는 데 있어서 중요한 요소는 촉매의 내구성과 촉매의 연소성능이다. 촉매층의 온도가 내열 온도 이상으로 고온이 되면 촉매는 신터링이 일어나 촉매성능이 저하한다. 따라서 촉매의 내구성에 직접적인 영향을 미치는 촉매층의 온도를 측정하여 안정적인 운전이 가능한 운전조건을 도출하였다. 그리고 다양한 운전 조건에서 촉매버너의 연소효율과 NOx 배출량을 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서 사용한 실험장치의 구성은 Fig. 1과 같다. 실험장치는 연료와 공기의 공급 시스템, 촉매버너, 온도측정 시스템 및 배기가스 분석 시스템으로 구성되어 있다.

연료는 순수 메탄(99.9%)을 사용하였으며, 가버너와 유량 조절기(mass flow controller)를 통하여 필요한 유량을 공급하였다. 공기는 공기 압축기로부터 공급하였으며 압축공기 속의 응축수를 제거하기 위하여 제습기를 사용하였다. 공기는 가버너와 유량 조절기를 사용하여 필요한 유량을 공급하였다. 촉매버너로 공급된 공기와 연료의 예혼합기는 확대노즐을 지나, 400cell/in²의 유동 안정용 하니컴을 통과하여 촉매층으로 들어간다. 혼합기는 촉

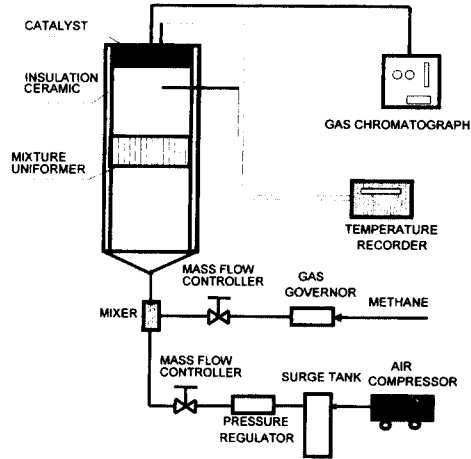


Fig. 1 Schematic diagram of experiment equipment

매층 내에서 산화반응을 거친 후 대기 중으로 방출된다.

촉매버너의 크기는 10.0 cm×10.0 cm의 정사각형이며 여기에 설치될 촉매의 두께는 변경이 가능하도록 하였다. 촉매로부터의 방열을 억제하기 위하여 촉매버너에 두께 5 mm의 세라믹 파이버로 단열하였다. 촉매층 내에서의 온도를 측정하고 배기가스를 분석하기 위하여 열전대와 샘플링 프로브를 촉매층 내에 설치하였다.

2.2 촉매준비

실험에 사용한 촉매는 하니컴(cordierite, 400 cells/in²)에 BaO/γ-Al₂O₃을 washcoating한 후, 여기에 Pd/NiO를 담지하여 800°C에서 소성하였다. 촉매의 내열온도는 약 900°C이며, 촉매의 크기는 8.9 cm×8.9 cm이며 두께는 각각 15, 30, 60 mm이다.

2.3 실험방법

촉매버너의 초기 점화를 위하여 촉매층 표면에 점화기를 설치하였다. 점화기를 사용하여 촉매층 출구 표면에 화염연소를 만들고 이 때 발생한 열이 촉매층 내로 전달되어 촉매층이 가열되도록 하였다. 촉매층의 온도가 촉매반응이 시작되는 온도 이상으로 가열되면 촉매층 표면에서 화염은 서서히 사라지고 촉매층 내에서 완전한 촉매반응으로 전환된다.

연소가스의 샘플링은 Fig. 1에 표시한 바와 같이 샘플링 프로브를 촉매층의 중앙에서 이송장치를 사

용하여 수직 하향으로 측정하고자 하는 위치에 삽입하여 실시하였다. 샘플링 관은 직경 0.7 mm의 스테인레스 관을 사용하였다. 포집 가스의 흡입속도가 최대 10 ml/min까지는 촉매층의 반응에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 본 실험에서는 샘플링 속도를 3 ml/min으로 고정하여 연소가스를 포집, 분석하였다.

가스분석에는 가스 크로마토그래프(Schimidzu GC, 9A)의 열전도형(TCD)을 사용하였다. 배기가스 중의 CH₄, CO₂, CO의 농도를 분석하고 다음의 식을 이용하여 메탄의 전환율과 연소효율을 각각 계산하였다.

$$\text{메탄의 전환율(\%)} = \left(\frac{\text{반응전 CH}_4}{\text{반응후 CH}_4} \right) \times 100$$

$$\text{연소효율(\%)} = \frac{[\text{CO}_2]}{[\text{CO}_2] + [\text{미연 HC}] + [\text{CO}]} \times 100$$

촉매층 내의 온도 측정은 소선 직경 0.2 mm의 K-type 열전대를 사용하였다. 촉매층 내에서의 온도는 촉매의 고체 온도와 가스 온도를 구분하여 측정하였다. 고체 온도의 측정을 위해서는 촉매층 중앙의 하니컴 셀의 벽에 열전대를 측면으로부터 삽입하여 필요한 위치에 세라믹 접착제로 접합시켰다. 한편, 가스 온도는 촉매층의 중앙에서 이송장치를 사용하여 열전대를 수직 하향으로 측정하고자 하는 위치에 삽입하여 측정하였다. 다양한 운전 조건에서 촉매버너의 온도특성을 분석하였으며 촉매층의 최고 온도를 구하여 촉매의 내열 온도에 적합한 안정적인 촉매연소 조건을 도출하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 온도특성

Fig. 2는 과잉 공기비를 변화시키면서 촉매층 두께 30 mm, 연소량 7.2 kcal/h · cm²에서 촉매층의 고체 온도를 측정한 결과이다. 온도분포는 촉매층의 중심선에서 입구 표면으로부터 출구 표면까지 측정하였다.

Fig. 2에서 보는 바와 같이 과잉 공기비를 1.0에서부터 증가시키면 최고 온도가 급격히 올라간다. 그러나 과잉 공기비 2.0에서는 최고 온도는 더 이상 증가하지 않으며, 과잉 공기비가 2.0 이상으로 증가하면 오히려 최고 온도는 감소한다. 과잉 공기비 2.25이상에서는 안정적인 촉매연소가 지속되지 못하였다. 이것은 과잉 공기비 증가에 따른 혼합기

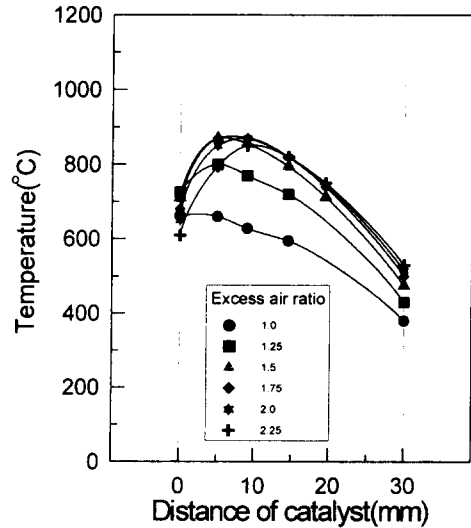


Fig. 2 Effects of the excess air on the solid temperature distribution of the catalyst layer at heat flux 7.2 kcal/h · cm²

량이 증가하게 되어 촉매표면으로부터 혼합기로 전달되는 열량이 증가하여 촉매층의 표면온도가 촉매연소가 지속되는 온도 이하로 낮아지기 때문이라고 생각된다. 한편, 촉매층 내에서의 최고 온도 위치는 과잉 공기비가 증가할수록 촉매층 입구 쪽에서 출구 쪽으로 이동한다. 이것은 촉매층에 들어가는 혼합기의 양이 많을수록 촉매층 입구를 냉각시키는 효과가 커져서 촉매반응을 지연시키기 때문이라고 판단된다.

촉매층 내에서의 온도분포는 일반적으로 촉매층 입구로부터 급격히 상승하여 최고 온도에 도달한 후에 촉매층 출구 쪽에서 서서히 저하한다. 최고 온도의 위치가 촉매층의 입구 쪽에서 나타나는 것은 촉매 반응이 매우 빨라서 반응이 촉매층 입구 쪽에서 완결되는 것으로 판단된다. 촉매층 내에서의 반응특성은 촉매층 내에서의 연소가스 분석을 통하여 얻을 수 있었으며 그 결과는 다음절에서 기술한다.

Fig. 3은 연소량이 촉매층의 온도에 미치는 영향을 나타낸다. 과잉 공기비를 1.25로 일정하게 하고 연소량을 7.2 kcal/h · cm²에서 18.0 kcal/h · cm²까지 증가시켰을 때 촉매층의 표면 온도를 측정할 결과이다.

촉매층의 최고 온도는 연소량이 증가할수록 거의 비례적으로 증가하는 양상을 보인다. 최고 온도 위

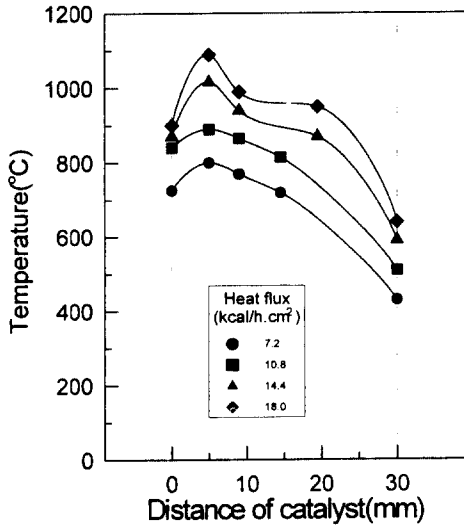


Fig. 3 Effects of heat flux on the solid temperature distribution of the catalyst layer at excess air ratio 1.25

치는 입구로부터 약 5 mm인 지점에서 나타나며 연소량의 변화에 관계없이 거의 같은 위치에서 나타나고 있다. 이것은 연소량이 7.2 kcal/h · cm²에서 18.0 kcal/h · cm²까지 증가하여도 촉매층의 입구가 가까이에서 혼합기의 촉매반응이 거의 완료되기 때문이라고 판단된다.

Fig. 4는 운전 조건에 따른 촉매층 입구와 출구의 온도를 측정된 결과이다. 촉매층 입구의 온도는 과잉 공기비 1.25에서 최고 값을 가진 후에 과잉 공기비가 증가함에 따라 서서히 감소한다. 이것은 과잉 공기비가 증가하면 혼합기량이 증가하게 되어 촉매층 입구에서 냉각효과가 커지기 때문이다.

촉매층 출구의 온도는 과잉 공기비가 증가하면 거의 직선적으로 증가하고 있다. 이것은 앞에서 기술한 바와 같이 과잉 공기비가 증가하면 촉매층에서의 최고온도는 증가하고 그 위치는 촉매층 출구 쪽으로 이동하기 때문이다. 촉매버너를 복사 가열기로 이용하고자 할 때는 촉매층의 출구 온도를 가급적 높게 유지하는 것이 유리하다. 이런 점을 감안할 때, 동일한 연소량에서는 안정적인 촉매연소 범위 내에서 가급적 과잉 공기비를 크게 하는 것이 유리하다.

Fig. 5는 촉매층에서 촉매 표면의 온도(고체 온도)와 가스의 온도를 각각 측정하여 비교한 결과이다. 촉매연소는 반응이 촉매표면에서 일어나며 이

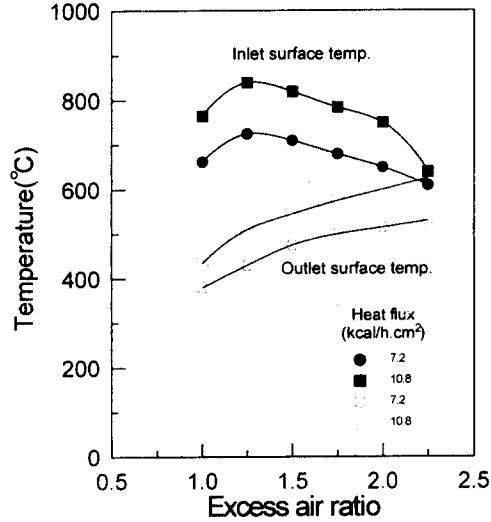


Fig. 4 Effects of excess air on inlet and outlet surface temperature of the catalyst

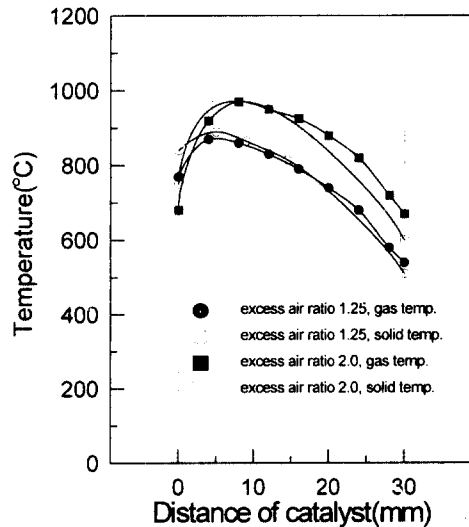


Fig. 5 Solid and gas temperature distribution of the catalyst layer at heat flux 10.8 kcal/h · cm²

때 발생한 열로 인하여 혼합기(가스)의 온도가 상승하게 된다. 따라서 촉매버너에서는 일반적으로 촉매표면 온도가 가스의 온도 보다 더 높다.

Fig. 5에 나타난 바와 같이 촉매층의 입구에서는 고체의 온도가 가스의 온도보다 높고, 그 차이는 촉매층 입구에서 가장 크며 이후에는 서서히 줄어든다. 이것은 상온의 혼합기가 촉매층의 입구에서부터 촉매표면에서 발생된 열로 가열이 시작되기

때문이다.

한편, 촉매층 출구에서는 기체의 온도가 고체온도 보다 더 높게 나타났다. 이것은 혼합기의 반응이 촉매층의 입구 부근에서 거의 완결되어 출구 부근에서는 촉매반응에 의한 열 발생이 거의 없는 것을 의미한다. 다음절에 기술한 촉매층 내에서의 연소가스 분석에 대한 실험 결과는 이러한 사실을 설명하고 있다. 촉매층에서 촉매표면의 최고 온도와 가스의 최고 온도의 차이는 약 30°C 이내이다.

촉매버너를 촉매층 표면에 설치한 점화기로 점화시킬 때, 촉매버너의 운전조건에 따라서 촉매연소의 패턴이 바뀌게 된다. Fig. 6은 촉매버너의 점화시의 촉매연소 패턴과 촉매층의 온도분포를 측정할 결과이다.

과잉 공기비 1.0~1.6에서 점화시킬 때는 촉매층 내에서 촉매반응이 완결된다. 그러나, 공기비 1.6~2.0에서 점화시킬 때는 촉매층 내에서 혼합기의 일부만이 반응되고 나머지는 촉매층 표면에서 기상반응에 의해 완결된다. 이때 촉매층 표면에는 화염이 형성된다. 공기비를 2.0이상으로 증가시키면 blow-out이 발생하였다.

점화시에 과잉 공기비에 따라서 촉매연소의 패턴이 달라지는 것은 점화시에 촉매층 표면에 형성된 화염으로부터 촉매층으로의 전열량이 다르기 때문이다. 과잉 공기비가 1.6이하인 경우에는 촉매층 표면에 형성된 화염으로부터 촉매층으로의 전열량이 충분하여 촉매층은 촉매반응이 시작될 수 있는 온도 이상으로 가열된다. 반면에 과잉 공기비가 1.6이상으로 증가하면 촉매층으로의 전열량이 감소하여 촉매층은 촉매반응이 시작할 수 있는 온도 이상으로 충분히 가열되지 못한다.

이러한 결과로부터 점화기를 이용하여 촉매버너를 점화시키는 경우에는 촉매층에서 완전한 촉매반응이 일어나도록 적절한 공기비로 조절해야 함을 알 수 있다.

3.2 연소특성

Fig. 7은 촉매층 내에서 메탄의 농도와 전환율을 측정할 결과이다. 메탄은 촉매층 입구로부터 10 mm이내에서 촉매반응에 의해 95%이상 감소하고 있다. 한편 촉매층 내에서 촉매표면의 온도는 촉매층 입구로부터 10 mm이내에서 최고를 나타내고 출구 쪽으로 갈수록 서서히 감소한다. 이것은 메탄의 반응이 촉매층 입구로부터 0-10mm에서 완료되며

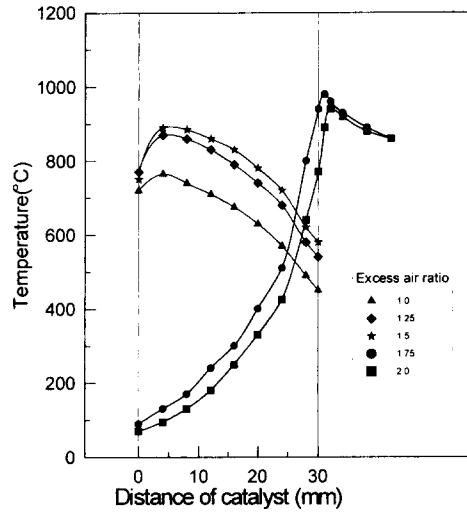


Fig. 6 Temperature distribution of two patterns of catalytic combustion when an igniter is used for starting catalytic combustion. heat flux : 10.8 kcal/h · cm², catalyst thickness : 30 mm

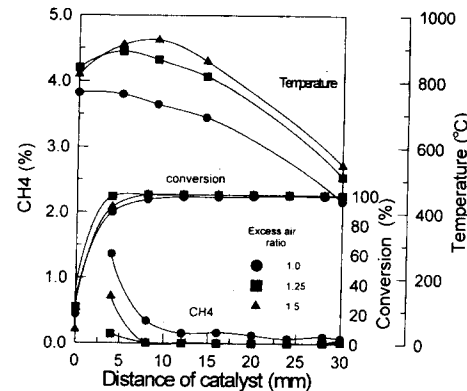


Fig. 7 Methane concentration and conversion, gas temperature distribution within the catalyst layer at heat flux 10.8 kcal/h · cm²

이로 인하여 촉매의 온도가 이 지점에서 최고가 되는 것으로 판단된다.

Fig. 8은 촉매층 두께가 다를 때에 촉매층 내에서의 연소상태를 분석한 결과이다. (a)는 촉매층 두께 15 mm, (b)는 촉매층두께 30 mm, (c)는 촉매층 두께 60 mm에서 각각 측정할 결과이다.

모든 경우에 있어서 촉매층 입구에서부터 촉매반응이 급격히 진행되어 촉매층 입구로부터 0~10 mm 근방에서 메탄의 반응이 거의 완료되는 것을

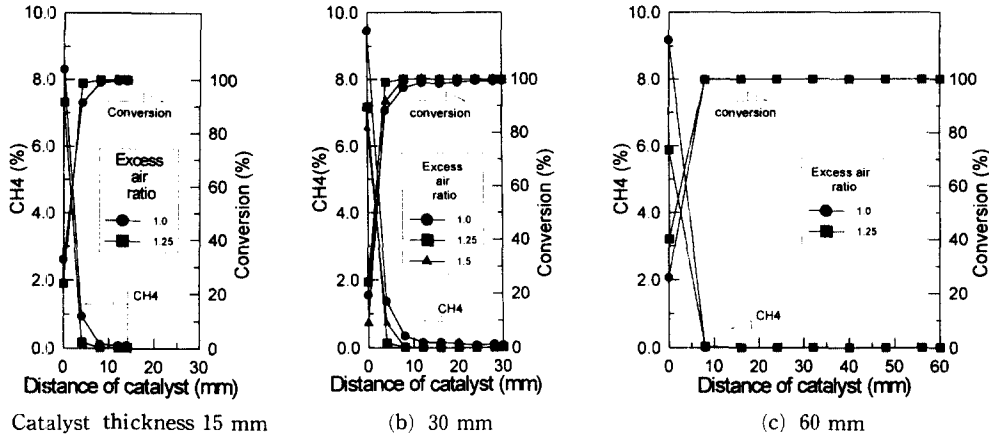


Fig. 8 Methane concentration and conversion vs catalyst thickness at heat flux of 10.8 kcal/h · cm²

보여주고 있다. 이것은 본 실험에 사용한 촉매를 가지고 촉매버너를 설계할 때는 촉매층의 두께가 최소 10 mm 이상이 되어야 하는 것을 의미한다.

촉매버너가 연소기로서 구비해야 할 조건은 연소 효율이 100%에 가까워야 한다. 촉매버너의 연소효율은 촉매층 출구에서 연소가스를 포집하여 분석함으로써 측정 가능하다. Fig. 9는 촉매버너의 연소효율을 측정 한 결과이다.

과잉 공기비 1.0에서는 연소효율이 85~90%이다. 과잉 공기비가 증가하면 연소효율은 급격히 증가하여 과잉 공기비 1.25이상에서는 연소효율이 99.5% 이상이 된다. 촉매버너의 설계를 위해서는 연소효율이 99.5% 이상으로 유지되도록 과잉 공기비를 1.25 이상으로 선정해야 한다.

Fig. 10은 촉매버너로부터 배출되는 NOx를 측정 한 결과이다. NOx의 배출량은 모두 1.0ppm 이하이다. 본 실험에 사용한 NOx계측기의 측정정밀도가 ±1ppm인 점을 고려할 때 촉매버너의 NOx 배출량은 거의 없는 것으로 보인다. 본 실험에 사용한 촉매버너에서 근본적으로 NOx가 배출되지 않는 것은 첫째, 연료 중에 질소성분이 없고 둘째, 연소가스의 온도가 1000°C 이하이어서 Thermal NOx가 발생하지 않기 때문이다.

앞에서 설명한 바와 같이 촉매연소는 희박연소에 의하여 연소가스의 온도를 Thermal NOx가 발생하지 않는 낮은 온도로 유지하는 것이 가능하다. 따라서 촉매연소의 이러한 특성을 다양한 연소기에 적용하여 NOx 배출을 근본적으로 해결할 수 있다. 본 연구의 촉매버너는 기존의 표면연소 버너

대신에 저NOx 버너로 활용이 가능하다.

3.3 촉매연소 영역

촉매버너는 일정한 연료량에서 과잉 공기비가 증가하게 되면 촉매층에서 혼합기에 의한 열의 방출이 커지게 된다. 과잉 공기비가 과도하게 증가하면 촉매층 내에서 열발란스가 붕괴되어 촉매연소가 지속되지 못하고 꺼지게 된다. 또한 연료량이 과도하게 감소해도 촉매층에서 발생하는 열이 너무 적어 촉매연소가 지속되지 못한다. 한편, 연료량이 과도하게 증가하게 되면 촉매층에서 상류의 혼합기로 화염이 전파되는 역화가 발생한다.

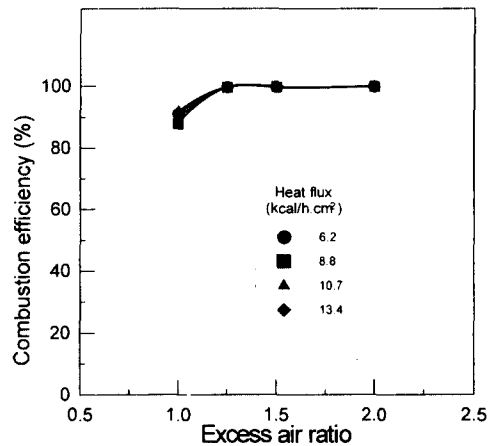


Fig. 9 Effects of the excess air on the combustion efficiency of the catalytic burner at various heat fluxes and the catalyst thickness of 30 mm

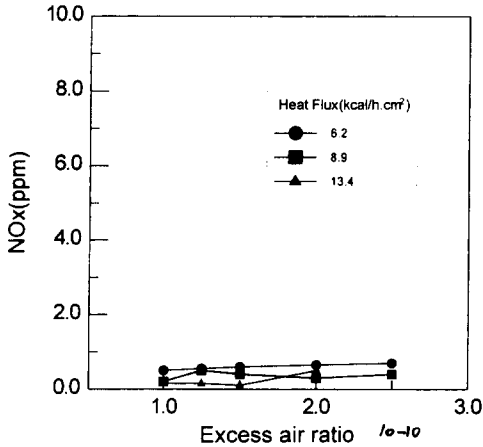


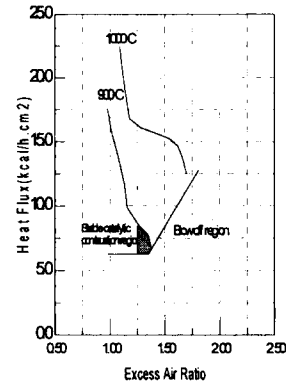
Fig. 10 NOx Emissions

촉매버너를 개발하기 위해서는 촉매연소가 꺼지지 않고 안정적인 촉매연소가 이루어지는 운전조건을 도출하여야 한다. Fig. 11은 여러 가지 운전조건에서 촉매연소 영역을 측정된 결과이다. (a)는 촉매층의 두께가 15 mm, (b)는 30 mm, (c)는 60 mm에 대하여 각각 측정된 결과이다.

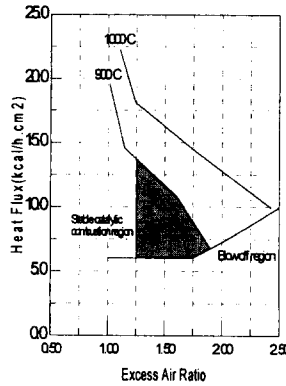
먼저 촉매층 내의 촉매표면(고체)의 최고 온도를 측정하여 Fig. 11에 등온선으로 표시하였다. 이것은 실험에 사용하는 촉매의 내열온도를 고려하여 안전한 운전이 가능한 영역을 도출하는 데에 필요하다. 본 실험에 사용한 촉매의 내열온도는 약 900°C이다. 그리고 앞절에서 기술한 바와 같이 촉매버너의 연소효율은 99.5% 이상이 되어야 실용성이 있다. 따라서 안전한 촉매연소 영역은 최고 온도가 900°C 이내이며, 동시에 연소효율이 99.5% 이상이 되는 영역이 된다.

Fig. 11에서 음영으로 나타난 부분이 안전한 촉매연소가 가능한 영역에 해당된다. 이 범위에서는 촉매층의 최고 온도는 900°C 이내이고, 연소효율은 99.5% 이상이며 역화나 blow-out이 발생하지 않는다. 촉매버너를 설계하기 위해서는 음영으로 표시된 부분을 설계조건으로 선정해야 한다.

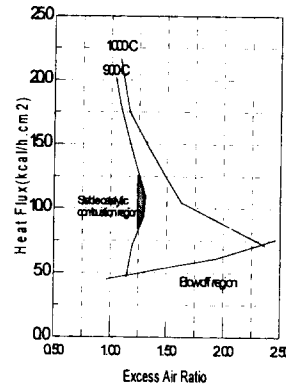
Fig. 11(a), (b), (c)를 서로 비교할 때, 촉매층 두께에 따라서 안전한 촉매연소 영역이 바뀌는 것을 볼 수 있다. 촉매층 두께 15 mm의 경우보다 30 mm의 경우에 촉매연소 영역이 더 넓게 나타난다. 60 mm의 경우에는 촉매연소 영역이 오히려 줄어들고 있다. 이것은 촉매층두께 60 mm에서는 촉매층의 최고 온도가 증가하기 때문이다.



(a) Catalytic thickness 15 mm



(b) 30 mm



(c) 60 mm

Fig. 11 Variation of catalytic combustion region with various catalytic thickness

촉매버너는 안정적인 촉매연소 영역이 가능한 넓어야 한다. 촉매연소 영역이 넓어야 연소량의 변화량(turn down ratio)을 넓게 조절할 수 있게 된다. Fig. 11에 나타난 결과에 의하면, 촉매층의 두께가

30 mm인 경우가 가장 적합한 것으로 판단된다. 촉매층의 두께를 30 mm로 선정할 때, 안정적인 촉매연소가 이루어지는 운전 조건은 공기비 1.25-1.75, 연소량 7-14kcal/h · cm²이다.

4. 결론

촉매버너를 개발하기 위하여 메탄을 연료로 한 촉매연소 특성에 대하여 실험하였다. 촉매는 하니컴(400cells/in²)에 Pd/NiO를 담지한 것을 사용하였다. 촉매층 내의 온도특성, 연소특성 및 촉매연소 영역에 대하여 실험하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 촉매층에서의 온도는 입구 부근에서 급격히 증가하여 최고에 도달한 후, 출구 쪽에서 서서히 감소한다. 최고 온도의 위치는 공기가 증가할수록 출구 쪽으로 이동한다. 최고 온도는 과잉 공기비와 연소량이 증가할수록 증가한다.

(2) 촉매버너의 점화시에 과잉 공기비 1.0-1.6에서는 촉매층 내에서 촉매연소가 발생하고, 과잉 공기비 1.6-2.0에서는 촉매층 출구 표면에서 화염연소가 발생하며, 과잉 공기비 2.0 이상에서는 blow out이 발생한다.

(3) 촉매층 내에서의 연소는 촉매층의 두께와 과잉 공기비와는 무관하게 촉매층 입구로부터 0-10 mm지점에서 95% 이상 연소가 이루어진다.

(4) 촉매버너의 연소효율은 과잉 공기비 1.0에서 85-90%이고 과잉 공기비 1.25이상에서 99.5% 이상이 되어 완전연소가 가능하다.

(5) 촉매버너의 NOx 배출량은 모든 운전 조건에서 1.0ppm이하로 NOx의 배출량의 거의 없다.

(6) 연소효율은 99.5% 이상이고 촉매층 최고온도는 900℃ 이내이며 동시에 역화나 blow-out이 없는 안정적인 촉매연소 영역을 도출하였다. 안정적인 촉매연소 영역은 촉매층 두께에 따라 달라지

며, 촉매층이 30 mm인 경우가 가장 넓은 촉매연소 영역을 나타냈다.

(6) 본 촉매를 이용하여 촉매버너를 설계할 때, 안정적인 촉매연소가 가능한 과잉 공기비는 1.25-1.75, 연소량은 7-14kcal/h · cm², 그리고 촉매 두께는 30 mm로 나타났다.

참고문헌

- (1) 貞森搏己, 1979, “觸媒燃焼技術の現状,” 燃料協會誌, 第58卷 第626號, pp. 422~431.
- (2) 서용석 외, 1994, “촉매연소를 이용한 저NOx형 가스터빈의 개발연구,” Energy R&D, Vol. 16, No. 4, pp. 77~90.
- (3) S. K. Agarwal *et al*, 1992, “Fundamental Study of NOx Control in Catalytic Combustion,” NTIS Report PB94-112323.
- (4) 荒井弘通 外, 1991, “高温燃焼におけるNOx低減と觸媒燃焼,” 觸媒, 第33卷, 第5號, pp. 328~334.
- (5) Ravi Prasad *et al*, 1984, “Catalytic Combustion,” Catal. Rev. -Sci. Eng., 26(1), pp. 1~58.
- (6) 강성규 외, 1992, “촉매연소 기술현황,” Energy R&D, Vol. 14, No. 3, pp. 160~182.
- (7) Marc D. Rumminger *et al*, 1996, “Numerical Analysis of a Catalytic Radiant Burner : Effect of Catalyst on Flame Stabilization,” Abstracts of 3rd Int. Workshop on Catalytic Combustion, Amsterdam.
- (8) 貞森搏己 外, “遠赤外線放射式 觸媒燃焼バーナーの開発と利用技術,” 工業加熱, Vol. 24, No. 4, pp. 23~31.
- (9) 이진복 외, 1995, “가열(건조)공정에 대한 촉매버너의 에너지절약 효과,” 제10회 에너지절약 기술워크샵논문집, pp. 203~218.