

매트촉매 버너의 연소특성 분석
송광섭, 정남조, 김희연
한국에너지기술연구원 나노소재 연구센터

Analysis of combustion characteristics for fiber mat catalytic burners

Kwang Sup Song, Nam Jo Jung, Hee Yeon Kim

Korea Institute of Energy Research

1. 서론

일반적으로 촉매연소를 활용하면 낮은 온도에서 연소반응이 안정적으로 일어나기 때문에 공해물질의 배출이 적고 효율적으로 열을 사용할 수 있다고 알려져 있다^[2]. 저온의 열을 사용하기 위해 만들어진 촉매연소장치는 주로 매트 형태의 연소촉매를 사용하고 있으며 확산식 연소방식에 의해 연소가 이루어진다. 확산식 연소방식은 연소촉매를 기준으로 서로 반대 방향에서 연료와 공기가 각각 공급된다 즉, 연료는 촉매연소 버너 내부의 노즐을 통해 공급되는 반면, 산소는 연료공급 방향과 반대방향으로 외부공기로부터 확산에 의해 촉매 표면에도달되도록 되어 있다. 확산식 촉매연소 버너는 이와 같은 구조적인 특성으로 인하여 열부하량이 1.0~2.0 kcal/cm².h로 낮고 주로 낮은 온도의 열원을 필요로 하는 공정에서 활용되고 있다. 또한 밀폐된 공간에서 산소의 공급이 원활하지 않으면 산소가 버너 내부로 쉽게 확산되지 못하기 때문에 연소성능이 떨어진다. 그럼에도 불구하고 확산식 매트형태 촉매연소버너가 사용되는 이유는 전열방식이 기존의 대류방식이 아닌 복사전열 방식으로 열이 전달되기 때문이다. 연소에 의해 발생한 연소열이 원적외선 형태로 피가열체에 전달되면 열손실을 줄이면서 피가열체 내부까지 열이 쉽게 전달되어 균일한 건조가 가능하다 실제 표면과 내부의 건조속도 차이가 적으면 피가열체 내부에 있던 수분이 표면의 기공이 축소되기 전에 외부로 빠져나가기 때문에 건조속도가 빨라지며 제품의 특성을 향상시킬 수 있다

확산식 촉매연소 버너는 외부로부터 산소가 확산되어야 하기 때문에 사용하는데 많은 제약이 있다. 이를 극복하기 위해 연료를 공기와 미리 혼합하여 공급하는 예혼합 방식의 연소가 시도되고 있다^[3]. 촉매연소 버너에서 예혼합 방식으로 연료를 공급하기 위해서는 촉매 층의 온도를 촉매연소 개시반응온도 이상으로 높게 유지해 주어야만 한다 이로 인해 다양한 형태의 촉매연소 버너가 만들어진다. 본 연구에서는 예혼합 방식으로 혼합가스를 공급하면서도 촉매 층이 반응온도 이상으로 유지도록 하기 위해 전기를 이용한 가열방법 대신에 전열관을 이용한 열 회수방법으로 연소가스를 예열할 수 있도록 시스템을 구성하였다 제작된 매트 촉매연소 버너를 이용하여 확산식과 예혼합 방식으로 촉매연소 버너의 연소특성 실험을 수행하였다. 확산방식에서 촉매연소 버너의 설치 방향에 따른 연소특성 변화와 촉매 층의 온도변화와 미연탄소의 배출량 사이의 연관성을 고찰하였고 예혼합 방식에서 전열관의 적절한 전열면적을 결정하기 위해 필요한 전열속도와 촉매연소버너 내부에 설치된 단열재의 전열속도를 측정하고 분석하여 매트 촉매연소버너의 제작에 활용할 수 있도록 하였다

2. 실험 장치 및 방법

1) 매트촉매연소 버너의 구조 및 제작

매트 촉매를 사용하는 촉매버너는 일반적으로 Fig 1에 나타낸 구조로 만들어진다. 연소용 공기의 공급방식에 관계없이 매트촉매연소 버너의 기본적인 구조는 같으며 구성은 연료가스를 공급하는 노즐 단열재, 히터, 촉매 등으로 구성되어 있다. 확산식 연소실험을 할 때에

는 버너 내부로 LPG만 공급하였고, 예혼합 방식으로 연소실험을 할 때에는 LPG와 공기의 혼합가스를 촉매버너 내부로 노즐을 통해 공급하였다. 매트촉매연소 버너에 사용된 연소촉매는 촉매 담체로 사용할 수 있는 알루미나 매트(Saffil CG MAT)에 백금을 함침법으로 담지 하여 제조하였다. 보온 단열재는 국내에서 보온재로 널리 사용하고 있는 세라크올이며, 주로 60 mm 정도를 촉매 안쪽에 설치하였다. 연소촉매의 예열을 위해 2 kW 용량의 전열선을 설치하였고, 촉매 층의 온도 및 단열재의 온도 측정을 위해 6개의 열전대를 설치하였다. 열전대의 설치 위치는 촉매버너 중심부에 두께 방향으로 매트 촉매가 외부에 노출된 표면, 매트 촉매 중심부, 매트 촉매와 단열재 사이, 단열재 사이에 20 mm 간격으로 2개, 단열재가 연료 분배 실에 노출된 면에 각각 설치하였다.

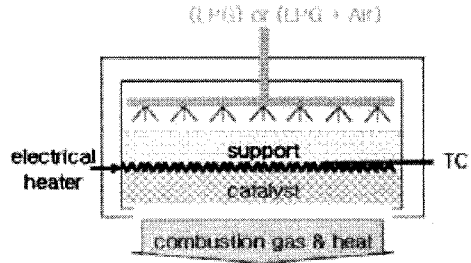


Fig. 1 Schematic diagram of fiber mat catalytic burner

2) 매트 촉매연소버너의 연소성능 실험방법

매트 형태 연소촉매를 사용하는 촉매연소 버너의 성능실험은 먼저 확산식 산소공급 방식으로 수행하였다. 이 실험의 목적은 매트 촉매연소 버너에서 산소의 확산이 반응성에 미치는 영향을 검토하기 위한 것이다 이를 위해 매트 연소촉매 버너를 여러 방향으로 설치하여 실험하였는데, 촉매연소 버너의 설치 방향은 세 가지 형태 이다 촉매연소 버너에서 연소가스 배출 면이 위 방향으로 되도록 하여 수행한 실험 버너의 연소가스 배출 면이 아래 방향으로 향하게 설치하고 수행한 실험 및 촉매연소 버너의 연소면이 아래 방향으로 향하게 설치되었으나 경사를 10° 정도 주어 비스듬하게 설치되도록 한 실험 등이다 실험방법은 먼저 전기히터를 이용하여 촉매 층의 온도가 250°C 이상 되도록 촉매 층을 충분히 예열한 다음, MFC를 이용하여 촉매연소 버너에 LPG 공급 하였다. 이 때 LPG의 유량은 실험조건에 따라 변화시켰는데, 연료의 공급량은 1~4 L/min 이었다. 촉매연소 버너의 촉매 층에 연료가 공급되기 시작하면 촉매연소 반응이 일어나기 시작하고, 촉매연소 반응에 의한 연소열 발생으로 촉매 층의 온도가 올라가기 시작한다 이 때 촉매연소 버너의 온도는 Hybrid recorder를 이용하여 기록하였는데, 촉매 층과 단열재 위치에 따른 온도를 측정하였다 한편, 연소가스 중에 존재하는 이산화탄소와 프로판 등은 촉매연소 버너의 내부온도가 일정해지면(대략 1.5시간) GC를 이용하여 분석하였고, NO_x 등은 전용가스 분석기를 이용하여 분석하였다

3. 실험 결과

매트 촉매버너에서 촉매 층의 온도는 실시간으로 연소상태를 알아볼 수 있는 손쉬운 지표이기 때문에 먼저 촉매버너의 내부 온도변화를 측정하였다 일반적으로 촉매연소 버너는 촉매를 예열한 다음 연료를 공급하기 때문에 촉매버너가 정상화 되는 데에는 화염연소 버너보다 많은 시간이 걸린다. Fig.2는 촉매연소 버너가 안정화 되었을 때(대략 연소개시 후 1.5 시간 정도소요) 매트 촉매연소 버너의 연소 방향에 따른 촉매버너의 내부온도를 나타낸 것이다. 매트형태의 연소촉매를 사용하는 촉매연소 버너에서 연소용 공기를 확산방식으로 공급하면 촉매 연소반응은 연료와 공기가 처음 만나는 촉매단열재 경계면에서 시작된다. 연료 공급량이 적을 때에는 연소반응이 주로 일어나는 곳이 촉매단열재 경계면을 유지하지만, 연소부하가 증가할수록 필요한 산소량 증가로 인해 연소반응 면이 촉매 외부 쪽으로 이동함을 알 수 있었다. 또한 낮은 연소부하(0.5 kcal/cm².h)에서는 버너 설치방향에 따른 연소 성능 차이가 거의 없지만, 연소부하가 증가하면 아래 방향으로 설치된 버너의 경우에 산소 공급

이 어려워 연소가 제대로 일어나지 않음을 알 수 있었다. 그러나 Fig.2(c)에서 보인바와 같이 매트 촉매버너를 약간 기울이면 연소성능이 향상됨을 알 수 있었다.

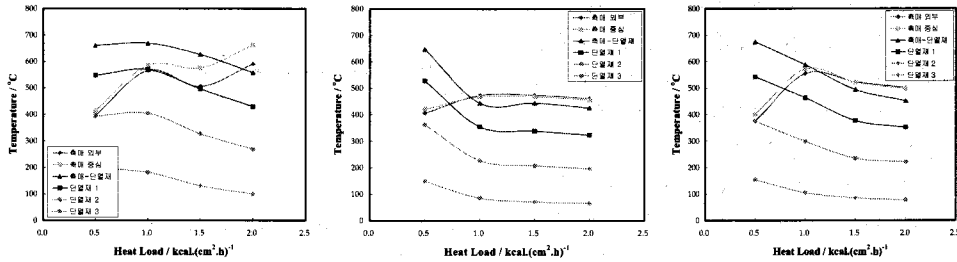


Fig. 2. Temperature profile in the fiber mat catalytic burner.
 (a) up ward (b) down ward (c) decline (10°)

촉매연소 버너의 연소성능은 연소가스의 분석으로 명확히 알 수 있는데 연소 방향에 따른 연소가스를 분석해보면 확산식 촉매연소 버너가 위 방향으로 설치되었을 때에는 연소효율이 99.5% 이상 되었으며 미연 LPG 농도가 25 ppm 이하였으나, 버너가 아래 방향으로 설치되었을 때에는 연소성능이 떨어지고 미연 LPG의 농도가 상당히 높아졌다. 하지만 촉매연소 버너를 약간 기울이면 산소공급이 원활해져 연소효율이 증가됨을 알 수 있었다.

매트 촉매연소 버너의 주변에 있는 공기의 온도가 산소의 확산에 미치는 영향분석과 연소를 통해 발생된 이산화탄소와 수증기가 산소의 확산에 어떤 영향을 주는지 파악하기 위해 일 동안 같은 조건을 유지하면서 경사진 촉매연소 버너의 아래 부분 중심부분, 위 부분에서 연소가스를 채취하여 분석하여 Table 1에 나타내었다. 배기가스 중에 존재하는 프로판의 농도는 표에서 보인바와 같이 시료채취 위치에 따라 차이를 보이고 있다 일반적으로 연소가스는 온도가 높기 때문에 촉매버너를 조금만 기울여도 대류 현상에 의해 연소가스가 경사면을 따라 위로 올라간다. 이로 인해 촉매버너의 아래 부분은 차가운 공기가 계속 공급되어 촉매표면 주위의 온도가 낮고 연소가스 층이 얇게 형성되는 반면 뜨거워진 연소가스가 계속 위로 이동하기 때문에 윗부분에서는 주위온도가 높고 연소가스 층이 두껍게 형성된다고 예측된다. 실험 결과에서 연소가스 중에 존재하는 프로판의 농도는 윗부분에서 채취할 때보다 아랫부분에서 채취할 때 높게 나타나고 있는데, 이로부터 산소의 확산은 배기가스에 공급에 따른 산소농도 감소에 의한 영향보다 연소열에 의해 촉매 주변의 온도상승에 더 많은 영향을 받는다고 생각할 수 있다. 실제 촉매연소버너의 응용장치를 만들 때 산소를 효율적으로 공급하는 것이 매우 중요한데 위 사실은 장치를 설계할 때 유용하다고 판단된다.

확산식 연소방식의 한계를 극복하기 위해 예혼합 방식으로 매트 촉매연소 버너의 연소실험을 수행하였다. 촉매연소 버너에서 예혼합 방식으로 안정적인 연소를 시키기 위해서는 연료와 공기의 혼합가스를 예열해 주어야 한다 본 연구에서 사용한 촉매 층 내부에 전열관 설치하여 연료가스를 예열하는 방식은 전열선을 사용하여 방식보다 자체연소에 의해 발생된

Table 1. Concentration of propane in the combustion gas with burner position.

sampling position	relative concentration of propane in the combustion gas (ppm)								
	first day			second day			third day		
lower	400	238	243	144	138		122	129	245
middle	88	60	72						
upper	73	58	56	55	62	54	18	22	15

열을 활용하기 때문에 연소 중에 전기소모 없이 지속적인 연소가 가능하고 연소부하가 높은 경우에도 연소촉매가 내열온도 이하에서 운전될 수 있도록 해주기 때문에 효율적이다. 전열관은 직경이 1/4인치 튜브를 이용하여 다중 관 형태로 만들었으며 촉매 층에서 온도가 가장 높은 부분인 외부 표면으로부터 촉매 두께의 3/4 정도 되는 지역에 설치하였다. 전열면적과 공기의 유량에 따른 회수 열량의 상관관계를 Fig.3에 나타내었고, 공기유량에 따른 열전도를 Fig.4에 나타내었다. 그림에 나타낸 바와 같이 전열 관에서 회수열량은 전열 관 내부로 흐르는 유체의 양이 많을수록 많아지고 또한 전열면적이 넓을수록 회수열량이 많아짐을 알 수 있었다. 실제 혼합가스의 유량이 90 L/min 인 경우에 전열면적이 750 cm²인 전열 관을 만들어 설치하면 500 W 이상의 열량을 회수되어 촉매연소버너가 안정적으로 연소됨을 확인하였다.

매트 촉매연소에서 촉매층 전에 설치된 단열재는 연소에 의해 발생된 열이 노즐 쪽으로 이동되는 것을 방지하는 것이 주요 역할이지만 연료가스가 단열재를 통과할 때 연소가스에 열을 공급해주는 역할도 한다 따라서 예혼합 방식으로 연료가스를 공급하는 매트촉매버너의 경우에 단열재의 두께 결정은 매우 중요하다. 최적의 단열재 두께를 결정하기 위해 단열재의 두께를 각각 40, 60, 80 mm로 된 매트 촉매연소버너 만들어 연료가스의 유량과 연소부하를 변경시키면서 전열속도를 측정하여 Fig.5에 나타내었다. 연료가스의 유량변화에 따라 촉매와 단열재의 접촉면 온도가 달라지는데 촉매와 단열재 접촉면에서 전열속도를 계산하여 보면 전열속도는 연료가스의 유량에는 영향이 없고 촉매와 단열재 접촉면의 온도에 의존한다는 것을 알 수 있었다. 또한 단열재의 전열속도가 낮기 때문에 단열재의 두께를 60 mm 이상으로 증가시켜도 연료가스에 공급되는 열량은 더 이상 증가되지 않음을 알 수 있었다.

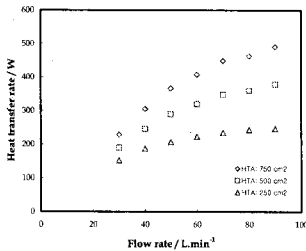


Fig. 3. Heat transfer rate with air flow rate.

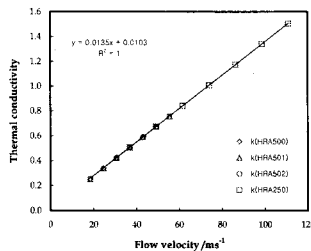


Fig. 4. Relation between thermal conductivity and air flow rate.

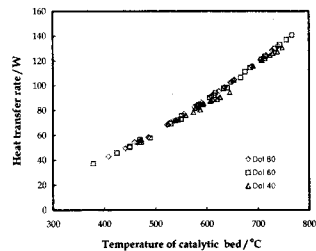


Fig. 5. Heat transfer rate with the catalytic bed temperature.

4. 결론

저온 열을 효율적으로 사용할 수 있는 촉매연소 기술의 활용 가능성을 높이기 위해 매트 형태 촉매를 사용하는 촉매연소버너를 제작하고 구조에 따른 연소성능에 대해 고찰하였다. 확산식 촉매연소 실험을 통해 연소면 방향이 연소반응에 영향을 주는 것을 확인하였고 촉매 주위 온도변화에 따른 산소의 확산속도 차이가 전환율에 많은 영향을 주는 것을 알았다. 예혼합 방식으로 연료를 공급하기 위해 전열관을 설치하여 실험한 결과 쉽게 연료가스를 예열할 수 있었고, 전열관과 단열재의 전열속도를 측정하여 매트 촉매연소버너의 기본 설계인자를 확보하였다.

5. 참고문헌

1. D.L. Trimm and Chi-Wai Lan, Chem. Eng. Sci, 1980, 35, 1731.
2. Y.S. Seo, S.J. Cho, K.S. Song and S.K. Kang, Int. J. Energy Res., 2002, 26, 921.
3. I. Cwri, M. Pavese, G. Saracco and V. Specchia, 2003, 81, 19.