

LPG-톨루엔 겸용 저온 촉매버너의 연소특성에 관한 실험적 연구

서용석*, 류인수**, 강성규***, 신현동****
(1998년 2월 23일 접수)

Experimental Study on the Low Temperature Catalytic Burner to Burn LPG and Toluene Alternately

Yong Seog Seo, Ihn Soo Ryu, Sung Kyu Kang and Hyun Dong Shin

Key Words: Catalytic Burner, Catalytic Combustion, Acryl Coating, Drying Process

Abstract

The aim of this study is to investigate the characteristics of the catalytic burner to burn LPG and toluene alternately which can be applied to the dryer of an acryl coating process of textile. It was difficult to obtain complete conversion when the catalytic burner was installed to downward direction. The catalytic burner was improved by introducing the forced diffusion combustion air and the premixing air. The optimal operating conditions for the newly improved catalytic burner were obtained. The catalytic burner for toluene mixture was also investigated to incinerate toluene mixture exhausted from drying process. Results showed that the catalytic burner could oxidize toluene mixture completely at the proper operating conditions. Finally, the catalytic burner to burn LPG and toluene alternately was applied to the dryer of acryl coating. By using the catalytic burner, benefits of energy savings and environmental protection were obtained.

1. 서 론

촉매연소는 반응물이 촉매표면에 흡착하여 촉매표면에서 반응이 일어난 후에 다시 표면으로부터 탈착하는 과정이 반복되면서 반응이 지속되는 현상이다. 일반적인 촉매반응은 화학공정에서 중간생성물을 제조하는 공정에서 많이 이용되고 있다. 특별히 가연성 가스를 촉매에 통과시켜 가연성분을 완전히 산화 반응시키는 것을 완전 산화 반응 또는 촉매연소라 부른다.

무기질 섬유에 귀금속 촉매를 담지한 촉매를

사용한 저온 촉매버너를 개발하여 난방용과 산업용 가열기 등으로 사용하고자 하는 연구가 활발히 이루어지고 있다^(1~4). Sadamori⁽¹⁾ 등은 메탄 연료의 촉매연소에 기존의 백금이나 팔라듐 촉매 대신에 로듐 촉매를 사용하면 완전 연소가 가능하며 내구성이 향상되는 것을 확인하였다. 그러나 그는 저온 촉매버너는 연소용 공기가 촉매층의 표면에서 자연 확산에 의하여 촉매층으로 침투하기 때문에 촉매버너의 설치 방법에 따라서 연소성능이 달라지는 것을 확인하였다. Lee⁽⁴⁾ 등은 전기히터를 사용하던 PVC 가열 공정에 저온 촉매버너를 적용하였을 때, 저온 촉매버너의 원적외선에 의한 전열효과의 상승에 의한 에너지 절약과 전기 대신에 가스연료를 사용함으로써 에너지 비용이 크게 개선되는 것을 확인하였다.

섬유 코팅 공정에서 섬유를 코팅하기 위한 코팅액으로 주로 톨루엔에 아크릴 수지를 녹여 사용한다. 코팅액을 섬유에 도포한 후, 이것을 건조

* 회원, 한국에너지기술연구소 촉매연소연구팀

** 한국에너지기술연구소 촉매연소연구팀

*** 한국에너지기술연구소 촉매연소연구팀

**** 회원, 한국과학기술원 기계공학과

기에 통과시켜 톨루엔을 증발 건조시킨다. 기존의 섬유 코팅 건조기는 대부분 열풍 건조방식을 사용하고 있다. 이 때 발생하는 톨루엔은 발암성 물질로서 그 처리가 문제가 되고 있다. 기존 설비에서는 톨루엔을 처리하기 위하여 주로 활성탄을 이용하여 회수하고 있지만, 운전비용이 높아서 거의 정상적인 운전이 이루어지지 못하고 있다.

섬유 코팅 건조기로부터 발생하는 톨루엔은 그 농도가 3000 ppm 이하의 초회박 가연 가스이다. 이것을 일반 화염연소를 사용하여 연소 소각할 경우에는 그 농도가 초회박이어서 연소가 어렵다. 그러나 촉매연소를 이용하면 초회박 연소가 가능하기 때문에 톨루엔 혼합기의 소각 처리가 용이할 수 있다.

LPG 연료와 톨루엔을 겸용으로 사용할 수 있는 촉매버너를 섬유코팅 공정에 적용하면 많은 효과가 예상된다. 섬유 코팅 건조기의 초기 시동 시에는 LPG 연료를 사용하고, 이어서 건조기가 정상 가동이 되면 건조기로부터 발생하는 톨루엔을 회수하여 촉매버너의 연료로 사용할 수 있다. 이렇게 하면 대기 중으로 방출하여 공해를 일으키던 톨루엔 문제를 해결할 수 있고, 또한 폐가스로 버려지던 톨루엔을 회수하여 다시 사용함으로써 에너지 절약의 2중의 효과를 얻을 수 있다.

본 연구에서는 섬유의 아크릴 코팅 건조 공정에 적용할 수 있는 LPG-톨루엔 겸용 저온 촉매버너의 촉매연소 특성에 대하여 실험하였다. LPG 연료를 사용한 저온 촉매버너를 수평 하향으로 설치하였을 때, 연소효율이 감소하는 것을 확인하였으며 이를 개선하기 위하여 강제확산 공기의 공급에 대하여 실험하였다. 또한 확산식 촉매연소 방식을 예혼합식으로 바꾸어 연소특성을 분석하였다. 이어서 톨루엔 혼합기를 사용하여 촉매버너의 연소 성능과 촉매층 내의 온도분포를 분석하였다. 마지막으로 LPG-톨루엔 겸용 저온 촉매버너를 실제의 섬유 코팅 건조기에 설치하여 운전하였으며 이때의 결과를 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험용 촉매버너의 제작

본 실험에서는 Al_2O_3 파이퍼를 지지체(substrate)로 하여 여기에 백금을 입힌 귀금속 촉매를 사용

하였다. 지지체는 영국 ICI사 제품인 Al_2O_3 파이퍼 매트(η -alumina 50%, $Al_2O_3 > 95\%$, $SiO_2 < 5\%$)를 사용하고, 촉매물질로는 1.0wt%Pt(파이퍼 기준)를 사용하였다. H_2PtCl_6 용액에 파이퍼 매트를 침전시켜 이를 탈수, 건조, 산화, 환원과정을 통하여 백금 촉매를 제조하였다⁽⁵⁾.

이렇게 제조한 촉매의 성능을 분석하기 위하여 소형 반응기에서 촉매의 반응성 실험을 실시하였다⁽⁶⁾. Fig. 1은 백금 촉매에 LPG를 통과시키기에 대한 반응성 실험 결과이다. 그림에서 가로축은 촉매가 충전된 반응기의 온도를 나타내고 세로축은 촉매층을 통과한 연소가스의 전환율을 나타낸다. 전환율은 촉매층에 들어가는 혼합기가 가질 수 있는 최대 CO_2 농도에 대하여 촉매층을 통과한 후의 실제 CO_2 농도의 비이다. 전환율이 100%이면 완전 연소가 이루어진 것을 의미한다. 본 연구에서 제조한 촉매를 여러 개의 시료(그림에서 임의의 번호 #1, #3, #5, #7, #11)를 준비하여 C_3H_8 농도 1.5~2.0%에 대하여 실험하였다. 본 실험에서 제조한 촉매는 반응기의 온도가 200~250 °C에서 촉매연소 반응을 시작하고 약 600 °C에서 완전 연소에 도달하였다.

실험에 사용한 LPG-톨루엔 겸용 저온 촉매버너의 구조는 Fig. 2와 같다. 촉매버너의 가장 앞쪽에 촉매층(두께 18 mm)이 있고, 촉매매트의 바로 뒷면에는 보온용 세라믹 파이퍼 매트(두께 20 mm)가 있다. 촉매매트와 보온재 매트 사이에는 열전대를 설치하여 촉매버너의 운전시에 촉매층의 온도를 감시하고, 보온재 속에는 전열히터(1kw)가 있다. 전열히터는 촉매버너를 점화시킬 때, 촉매층의 온도를 점화온도(약 250 °C)까지 예열하는데 사용한다. 보온재 매트 뒤에는 LPG 노즐과 톨루엔 노즐이 함께 설치되어 있다. LPG 노즐은 연소용 공기가 혼합되지 않은 LPG만을 공급하므로 환경이 작다. 그러나 톨루엔 노즐은 공기와 희석된 톨루엔을 공급하므로 환경이 LPG 노즐에 비하여 크다. 환경이 작은 LPG 노즐은 환경이 큰 톨루엔 노즐의 앞쪽에 위치하도록 하였다. LPG를 사용할 때에는 촉매층에서 확산연소로 촉매연소가 이루어지고, 톨루엔 혼합기를 사용할 때에는 촉매층에서 예혼합 연소로 촉매연소가 이루어진다.

촉매버너의 촉매층 앞면에는 촉매층을 보호하기 위한 보호 철망이 있다. 촉매버너의 측면에

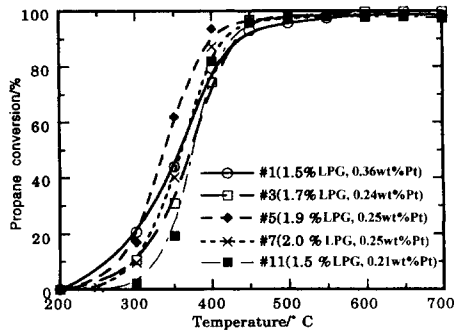


Fig. 1 Catalytic activity of LPG over Pt/Al₂O₃ catalyst (Heat load 1.0: kcal/h/cm², Excess air ratio: 1.1).

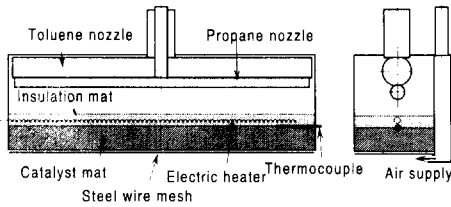


Fig. 2 Schematic diagram of the catalytic burner to burn LPG and toluene alternately.

설치된 연소용 공기 공급관은 LPG 연료를 사용할 때 촉매층 앞면에 연소용 공기를 강제적으로 공급하여 촉매층에서의 연소를 촉진시키기 위한 것이다. 그러나, 톨루엔을 사용할 경우에는 공기 공급관을 통하여 연소용 공기의 공급이 필요하지 않는다.

촉매버너를 운전하기 위해서는 먼저 전열선에 전기를 공급하여 촉매층을 예열한다. 촉매층의 예열온도는 200~250 °C가 되도록 한다. 촉매층이 이 온도에 도달하면 LPG 공급관을 열어 LPG를 공급한다. 촉매층에서 연소가 정상적으로 이루어지면 전열선의 전기 공급을 차단한다.

2.2 LPG용 실험장치

LPG를 위한 촉매버너의 실험장치를 Fig. 3에 보여주고 있다. 가스는 봄베용 LPG를 사용하였다. LPG는 가버너를 통하여 적정 압력으로 조절하고 오리피스 유량계와 습식 가스미터를 사용하여 유량을 계측하였다. 공기는 컴퓨터를 사용

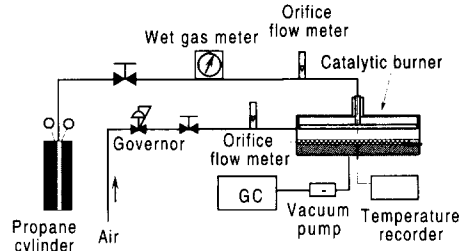


Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus for propane.

하여 공급하였으며, 가버너를 이용하여 적정 압력으로 감압 하여 오리피스 유량계를 이용하여 유량을 측정하였다.

촉매층의 온도를 측정하기 위해서 K-type 열전대(보호관 직경 1.6 mm)를 사용하였다. 열전대는 촉매버너의 중앙에서 촉매층 두께의 5 mm 간격으로 설치하였다. 촉매층을 통과하여 나온 연소 가스분석을 위하여 샘플 프로브는 직경 3 mm의 스테인레스 관을 이용하였다. 프로브는 촉매층 표면으로부터 3 mm 떨어진 위치에 설치하고 진공펌프를 사용하여 연소 가스를 포집 하였다.

연소 가스의 분석은 가스크로마토그래프(Model : HP5890)를 사용하였다. 촉매반응에 의해 생성되는 연소 가스로는 CO₂, H₂O, CO, H₂, N₂, O₂와 C₁~C₄ 등이 예상되므로 이들 성분을 동시에 분석하기 위해서 TCD와 FID를 직렬로 연결하여 사용하였다. 촉매버너의 연소효율 계산에는 다음의 식을 사용하였다.

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

2.3 톨루엔용 실험장치

톨루엔은 석유와 인쇄 등에 많이 사용되고 있는 용제로서 발암 물질로 알려져 있어서 그 취급이 용이하지 않다. 본 실험에서는 석유 코팅 공정에서 발생하는 톨루엔의 농도(수백 ppm~수천 ppm)와 유사한 농도로 톨루엔을 발생시키기 위하여 Fig. 4와 같은 실험장치를 제작하였다.

액체 상태의 톨루엔을 필요한 양으로 조절한 후에 전기히터가 설치된 증발기에 공급하여 기체 상태의 톨루엔을 만들었다. 연소용 공기는 컴퓨터로부터 공급하여 압력 조절기와 유량계를 거쳐 증발기에서 톨루엔과 혼합되도록 하였다. 톨

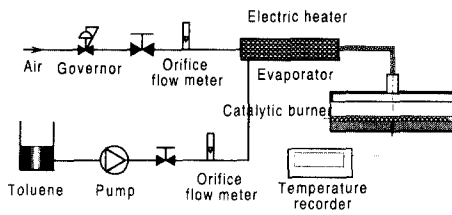


Fig. 4 Schematic diagram of experimental apparatus for toluene.

루엔 혼합기의 농도는 액체 톨루엔의 유량과 공기의 유량을 조절하여 적정 농도로 맞추었다. 본 실험에서는 톨루엔의 농도를 1000~7000 ppm 범위로 조정하였다.

톨루엔의 비점은 110.65 °C이므로 증발기에서는 200 °C 이상이 유지되도록 조절하였다. 증발기를 지난 후 촉매버너 입구까지는 전기 라인 히터를 설치하여 톨루엔 혼합기가 응축되지 않도록 하였으며, 촉매버너에 들어가는 입구에서 톨루엔 혼합기의 온도는 200 °C로 유지하였다. 연소가스의 분석을 위하여 샘플링 프로브는 직경 3 mm의 스테인레스 관을 사용하였으며, 촉매버너의 중앙에 촉매표면으로부터 3 mm 떨어진 위치에 설치하였다. 연소 가스는 진공펌프로 샘플 백에 포집한 후에 검지관으로 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 LPG의 실험

본 실험에 사용한 저온 촉매버너는 LPG 연료는 촉매층의 뒷면에서 앞면으로 공급되고 연소용 공기는 촉매층의 앞면에서 뒷면으로 자연확산에 의해서 공급되는 연소방식이다. 이러한 자연확산 연소 방식에서는 촉매버너의 설치 방법에 따라서 연소 성능이 변화될 것으로 예상된다. 먼저 Fig. 2의 촉매버너를 사용하여 수직, 수평상향, 수평하향으로 설치하여 각각의 경우에 대하여 촉매버너의 연소효율을 측정하였다. 이때 촉매버너는 촉매층 표면에 강제적인 연소용 공기의 공급이 없이 자연 확산 방식으로 운전하였다. Fig. 5는 촉매버너의 설치방법에 따른 연소 효율의 변화를 측정된 결과이다.

그림에서 가로축은 촉매버너의 열부하를 나타

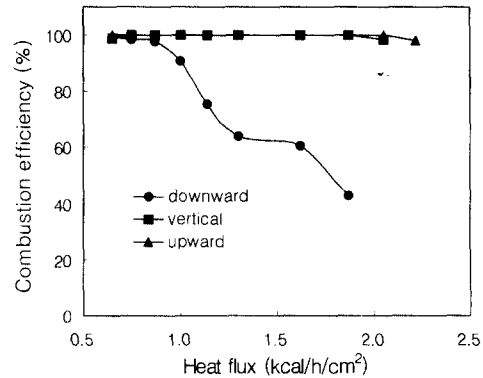


Fig. 5 Effect of installation modes on the combustion efficiency of the diffusive catalytic burner.

내는 것으로 촉매버너에 들어가는 열량을 단위시간, 단위 면적으로 환산한 값이다. 촉매버너를 수직과 수평상향으로 설치할 때에 열부하 0.7~1.8 kcal/h.cm² 범위에서 연소효율은 100 %로 나타났다. 열부하가 1.8 kcal/h.cm² 이상으로 증가하면 연소 효율이 감소하기 시작한다. 이것은 촉매층에 확산되어 들어가는 공기의 양이 어느 한계값 이상으로 증가하지 않기 때문이다.

한편, 촉매버너를 수평하향으로 설치할 경우에는 열부하에 따라서 연소효율이 급격히 변하였다. 열부하 0.6 kcal/h.cm²에서 연소효율이 99.3 %이었고, 열부하를 증가시켜 1.0 kcal/h.cm²일 때는 91 %로 감소하였다. 열부하가 1.6 kcal/h.cm²로 증가하면 연소효율은 60 %로 더욱 감소하였다. 이것은 촉매버너를 수평하향으로 설치하면 촉매층에서 나온 연소 가스가 촉매층 밀면에 적체되어 연소용 공기가 촉매층으로 확산되어 들어가는 것을 방해하기 때문이라고 판단된다.

피가열물이 컨베이어에 의하여 움직이는 건조 공정에 촉매버너를 사용할 경우에는 촉매버너를 피가열물의 바로 위에 수평하향으로 설치해야 하는 경우가 많다. 이러한 경우에 확산식 촉매버너를 그대로 사용하게 되면 완전 연소가 이루어지지 않는 것을 앞의 실험결과로부터 알 수 있다.

촉매버너를 수평 하향으로 설치하였을 때의 연소 효율을 개선하기 위한 하나의 방법으로 연소용 공기를 촉매버너의 측면에서 강제적으로 공급하도록 하였다. Fig. 2에서 보듯이 촉매버너의 측면에 연소용 공기를 공급하는 공기 노즐을 설치

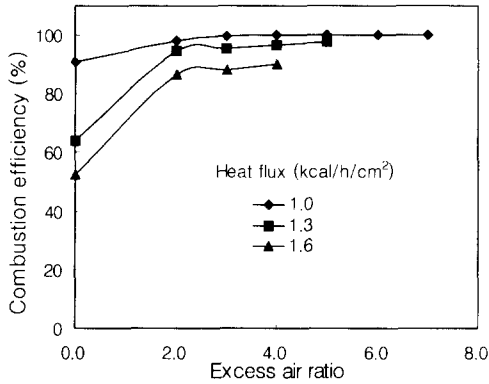


Fig. 6 Combustion efficiency of the catalytic burner when the combustion air is supplied to the outlet surface of the catalyst.

하였다. 공기 노즐은 슬릿 형태로 만들었으며 슬릿의 틈새는 2 mm로 하였으며, 촉매층과 슬릿과의 거리는 20 mm로 하였다.

Fig. 6은 촉매버너에 연소용 공기를 강제적으로 공급하였을 때의 촉매버너의 연소효율을 측정 한 결과이다. 전체적으로 연소용 공기의 공급량이 증가할수록 촉매버너의 연소효율은 증가하는 것으로 나타났다. 열부하가 1.0 kcal/h.cm²인 경우에 공기 공급량을 연료량을 기준으로 한 이론 공기량의 3배 이상으로 공급하면 연소효율이 100%에 도달하였다. 그러나 열부하가 증가하면 공기 공급량이 증가하더라도 100%의 연소효율을 얻기가 어려웠다. 열부하가 1.3 kcal/h.cm² 이상에서는 공기 공급량을 이론공기량의 5배 이상으로 공급하여도 연소효율이 100%에 도달하지 못하였다. 이 결과로부터 본 촉매버너를 수직 하향으로 설치하여 100%의 연소효율을 얻기 위해서는 열부하는 최대 1.0 kcal/h.cm², 공기 공급량은 이론 공기량의 3배 이상인 것을 알 수 있었다.

확산식 촉매버너를 수평 하향으로 설치했을 때 나타나는 연소효율의 감소를 개선할 수 있는 다른 방법은 연소방식을 확산식에서 예혼합식으로 바꾸는 것이다. 예혼합식 촉매연소는 Fig. 1의 확산식 촉매버너에 LPG와 연소용 공기를 혼합하여 공급하도록 하였다. Fig. 7은 예혼합식 촉매버너에서의 연소효율과 촉매층의 온도를 측정한 결과이다. Fig. 7(a)는 과잉공기비와 열부하에 대하여 촉매층의 온도를 측정한 결과이다. 촉매층의 온

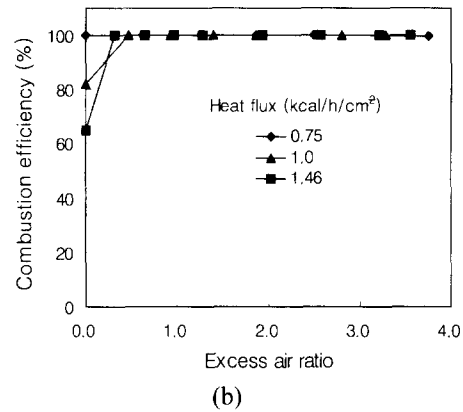
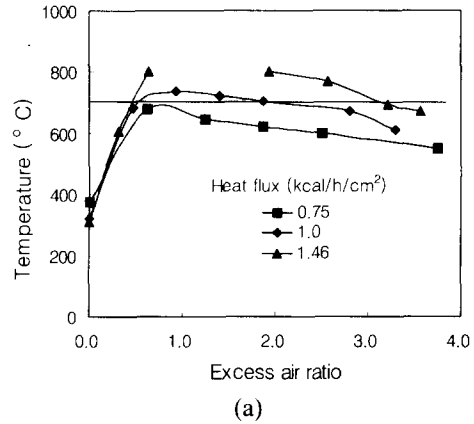


Fig. 7 Combustion efficiency and maximum temperatures within the catalyst in the premixed catalytic burner, (a) temperatures within the catalyst layer, (b) combustion efficiency.

도는 촉매층의 가장 안쪽면, 즉 보온재와 촉매층이 접하는 부분의 온도이다. 열부하 1.46 kcal/h.cm²에서 과잉공기비에 따른 촉매층의 온도를 살펴보면, 과잉공기비 0.0에서는 323 °C이며, 과잉공기비가 증가하기 시작하면 촉매층 온도는 급격히 증가하였다. 과잉공기비 0.6 이상에서는 800 °C 이상으로 증가하였다. 촉매층의 온도가 800 °C 이상이 되는 조건에서는 고온으로 인한 촉매의 손상을 피하기 위하여 실험을 중단하였다. 과잉공기비가 2.0 이상으로 증가하면 촉매층의 온도는 서서히 감소하기 시작하지만 아직도 700 °C 이상의 고온을 유지한다. 본 실험에서 사용한 촉매의 내열온도가 최대 700 °C 이하인 것을 고려하면 촉매층의 온도가 700 °C 이상이

되면 실용성이 없게 된다. 과잉공기비가 더욱 증가하여 3.6 이상이 되면 촉매층에서 연소반응이 지속되지 못하고 소화가 발생하였다. 이것은 촉매층에서 발생된 열량과 연소가스에 의하여 방출되는 열량의 열 발란스가 붕괴되기 때문이다.

한편, 열부하 1.0 kcal/h.cm²에서는 과잉공기비 0.9~1.87에서 촉매층 온도는 700 °C 이상으로 증가하였으며 과잉공기비 3.3 이상에서는 소화가 발생하였다. 열부하 0.75 kcal/h.cm²에서는 촉매층 온도는 전체적으로 700 °C 이하로 나타났으며, 과잉공기비 3.8 이상에서는 소화가 발생하였다. 이 결과로부터 촉매버너를 예혼합식으로 하였을 때, 촉매의 내열성을 고려하여 촉매층의 온도를 700 °C 이하로 제한한다면 운전이 가능한 조건은 열부하 0.75 kcal/h.cm² 이하가 됨을 알 수 있다.

Fig. 7(b)은 과잉공기비와 열부하에 대하여 예혼합식 촉매버너의 연소효율을 측정된 결과이다. 과잉공기비 0.0에서는 확산식 연소방식과 같게 되어서 열부하가 1.0 kcal/h.cm² 이상으로 증가하면 연소효율이 급격하게 감소하였다. 그러나 과잉공기비가 증가하면 연소효율은 증가하기 시작하여 과잉공기비 0.5이상에서는 모든 열부하에서 100 %의 연소효율이 얻어졌다. Fig. 7(a)과 Fig. 7(b)의 결과를 종합하여 볼 때, 저온 촉매버너를 예혼합식으로 만들면, 연소효율은 쉽게 100 %를 얻을 수 있으나 촉매층의 온도가 고온으로 되어 촉매버너를 촉매의 내열온도에 맞추어 사용하고 자 할 때에 운전조건이 많이 제한을 받는 것을 알 수 있다.

3.2 톨루엔의 실험

Fig. 2의 촉매버너를 사용하여 톨루엔 혼합기를 공급하여 그 특성을 실험하였다. 톨루엔 혼합기의 촉매연소는 예혼합 연소 방식이다. Fig. 8은 톨루엔 혼합기의 농도와 혼합기량에 따른 촉매층의 온도를 측정된 결과이다. 촉매층의 온도는 촉매층 표면으로부터 5 mm 두께마다 측정된 값 중에서 최대 값을 대표값으로 하였다. 그림에서 공간속도(space velocity)는 촉매의 단위 체적당 처리하는 톨루엔 혼합기의 유량(톨루엔 혼합기량/촉매의 체적)을 의미한다. 공간속도가 높다는 것은 촉매에 들어가는 톨루엔 혼합기의 양이 많다는 것을 의미한다.

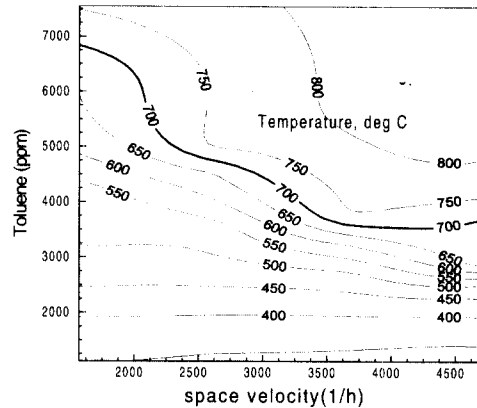


Fig. 8 Contour map of temperatures in the catalyst layer.

혼합기의 공간속도가 촉매층의 온도에 미치는 영향을 살펴보면, 톨루엔 농도 4000 ppm에서, 공간속도가 2000 h⁻¹일 때는 촉매층 온도는 약 550 °C이다가 공간속도가 4000 h⁻¹으로 증가하면 촉매층 온도는 약 750 °C로 증가하였다. 전체적으로 일정한 톨루엔 농도에서 공간속도가 증가하면 촉매층의 온도는 증가하였다. 이것은 공간속도가 증가함에 따라서 촉매의 단위 체적당 공급되는 혼합기량이 증가하여 촉매층에서 발생되는 열량이 증가하기 때문이라고 판단된다. 한편, 공간속도 3000 h⁻¹에서 톨루엔의 농도가 2000 ppm 때에는 촉매층의 온도가 약 400 °C이다가 톨루엔 농도가 5000 ppm으로 증가하면 촉매층 온도는 750 °C 이상으로 증가하였다. 톨루엔의 농도 증가와 함께 촉매층의 온도는 증가하는 경향을 나타냈다.

Fig. 8의 결과를 통하여 얻고자 하는 것 중의 하나는 촉매층의 내구온도를 고려하여 LPG를 사용하는 촉매버너의 안정적인 운전 조건을 도출하는 것이다. 본 실험에 사용한 촉매의 내열온도가 700 °C인 것을 감안하여 촉매층에서의 온도가 700 °C 이내가 되는 운전 조건을 Fig. 8의 결과로부터 얻을 수 있다. 이 결과를 활용하여 공정에서 발생하는 톨루엔의 농도가 주어진다면 촉매버너에 공급할 톨루엔 양을 결정할 수 있게된다.

한편 촉매층의 온도가 지나치게 낮아지면 촉매층에서 톨루엔 혼합기의 전환율이 낮아지고, 이어서 촉매반응에 의해서 발생하는 열과 연소가스에 의해서 방열되는 열량의 열 발란스가 붕괴되

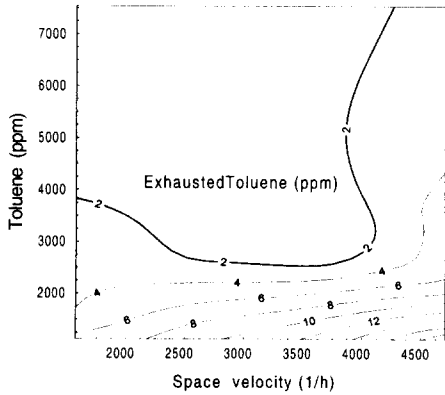


Fig. 9 Contour map of conversion in the toluene catalytic burner.

어 촉매버너가 꺼지게 된다. 촉매층의 온도가 400 °C 이하로 내려가면 촉매버너에서 소화가 발생하였다. 실제 공정에 촉매버너를 적용할 때에는 안전성을 고려하여 촉매층의 온도가 500 °C 이상으로 유지하는 것이 좋다고 생각된다.

Fig. 9는 톨루엔 혼합기의 농도와 공간속도에 대하여 톨루엔 혼합기가 촉매버너를 통과하여 연소된 후 배기가스 중의 미연 톨루엔 농도를 측정 한 결과이다. 일정한 톨루엔 농도에서 혼합기의 공간속도가 미연 톨루엔의 양에 미치는 영향을 살펴보면, 톨루엔 농도 2000 ppm에서 공간속도 2000 h⁻¹일 때에 미연 톨루엔 농도는 약 5 ppm이며, 공간속도가 4000 h⁻¹로 증가하면 미연 톨루엔 농도는 약 7 ppm으로 증가하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 전체적으로 공간속도가 증가하면 미연 톨루엔의 양이 증가하고 있다. 이러한 현상은 혼합기의 표면 반응속도와 관련이 있는 것으로 생각된다.

촉매에서 반응물의 반응속도는 반응물이 촉매 표면으로 침투하는 확산속도와 반응물의 농도에 의하여 결정된다⁽⁷⁾. 촉매층에서 일단 표면반응이 시작되면 촉매층의 온도가 급격히 증가하게 되며, 이어서 혼합기의 확산속도가 전체적인 반응속도를 결정하는 확산 지배 영역으로 진행된다. 확산 지배 영역에서는 공간속도가 증가하더라도 톨루엔의 확산속도는 거의 변화가 없으며 이에 따라 반응속도의 변화도 거의 없다. 따라서 공간속도가 증가하면 촉매층에 유입되는 혼합기의 양은 증가함에 불구하고 혼합기의 반응 속도는 증

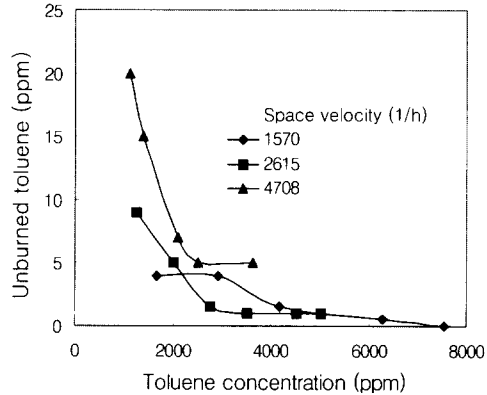


Fig. 10 Conversion of toluene as a function of its concentration.

가하지 않아서 미연분의 발생이 증가하게 된다.

한편, 공간속도가 일정하고 톨루엔의 농도가 증가하면 미연 톨루엔의 양이 감소하였다. 이것은 앞서 기술한 바와 같이 톨루엔의 농도가 증가하면 촉매 반응속도가 증가하기 때문이다. 전체적으로 공간속도 4000 h⁻¹ 이하, 톨루엔의 농도 4000 ppm 이상에서는 미연 톨루엔이 2 ppm 이하로 발생하였다. 그러나 공간속도가 4000 h⁻¹ 이상으로 증가하면 미연 톨루엔이 2 ppm 이상으로 발생하였다. Fig. 10은 촉매버너에 들어가는 톨루엔 혼합기의 입구 농도에 따른 미연 톨루엔의 농도를 측정한 결과이다. 그림에서 톨루엔 혼합기의 입구 농도가 증가하면 미연 톨루엔은 지수함수적으로 감소하는 것을 볼 수 있다.

3.3 섬유 코팅 건조기에서 촉매버너의 실험

Fig. 11은 LPG-톨루엔 겸용 저온 촉매버너를 적용한 섬유 코팅 건조기의 개념도이다. 건조기는 가열장치로서 촉매버너, 섬유 이송 설비, 코팅액 공급 장치, 공기 송풍기, 건조기 배풍기, LPG 연료 배관설비, 톨루엔 혼합기 회수 라인, 컨트롤 장치 등으로 구성되어 있다. 실증용 건조기의 건조실 크기는 길이 3 mm, 폭 2 mm, 높이 80 cm로 제작하였다. 건조실 내부에는 저온 촉매버너(가로 1.2 mm, 세로 40 cm) 8대를 설치하였다. LPG는 분배용 LPG를 사용하였다. 건조기로부터 발생하는 톨루엔 혼합기는 다시 회수하여 사용할 수 있도록 배관하였다. 건조기에서 발생하는 톨루엔의 농도가 1500ppm 이하로 낮을 경우에는

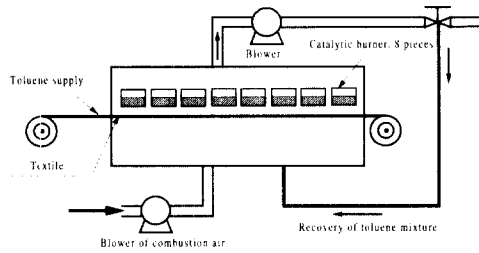


Fig. 11 Schematic diagram of drying system of textile coating using the catalytic burner.

톨루엔을 농축할 수 있는 농축설비⁽⁸⁾를 사용하여 촉매버너에 들어가는 톨루엔의 농도가 1500~3000 ppm이 되도록 하였다. 실험에 사용한 섬유는 폭 1.0 m의 다우다 제품이며, 섬유의 이송 속도는 최대 35 m/min까지 가능하도록 하였다. 건조하고자 하는 섬유와 촉매버너와 간격은 15 cm로 설치하였다. 건조기의 배기 송풍기의 배풍량은 2300 Nm³/h 이었다.

코팅 건조기의 운전은 먼저 LPG 연료를 공급하여 촉매버너를 시동한다. 각각의 촉매버너의 LPG 공급량은 촉매버너의 열부하가 1.0 kcal/h.cm² 이 되도록 하였다. 촉매버너가 정상적인 상태에 도달하면 섬유 이송 장치를 가동하여 섬유를 이송하였다. 동시에 아크릴 코팅액을 섬유의 표면에 도포 하였다. 실험에 사용한 코팅액은 아크릴수지가 15~20 %, 톨루엔이 80~85 % 혼합된 것을 사용하였다. 건조기가 정상적인 운전 상태에 도달하면 건조기로부터 톨루엔 혼합기가 발생하기 시작한다. 건조기로부터 발생된 톨루엔 혼합기는 회수하여 촉매버너에 공급하였다. 이 경우에는 LPG 공급관을 잠그고 톨루엔 공급관을 열어 톨루엔 혼합기를 공급하였다. LPG로 촉매버너를 가동하는 시간은 약 20분이면 충분하였다.

Fig. 12는 건조기로부터 발생하는 톨루엔의 농도를 섬유 이송 속도에 따라서 측정한 결과이다. 건조기로부터 배출되는 톨루엔 혼합기의 농도는 섬유 이송 속도가 5 m/min일 때 380 ppm이며, 섬유 이송속도가 증가할수록 톨루엔의 농도는 직선적으로 증가하여 이송속도가 25 m/min일 때, 약 900 ppm 까지 증가하였다. 그러나 섬유 이송속도가 25 m/min이상에서는 오히려 톨루엔의 농도가 감소하였다. 이것은 섬유 이송 속도가

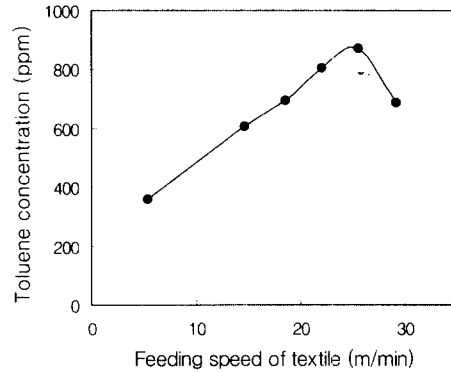


Fig. 12 Toluene concentration as a function of coating speed.

20 m/min 이상으로 되면 섬유의 건조가 불량해지고 톨루엔의 증발량이 감소하기 때문이었다.

이 결과로부터 본 실험에서 촉매버너를 사용한 실증용 코팅 건조기의 건조 성능을 예측할 수 있었다. 실험에 사용한 실증용 코팅 건조기는 실제 코팅 공장에서 사용되고 있는 열풍 건조기 중의 하나를 모델로 하여 이것을 1/3으로 축소하여 설계하였다. 모델로 삼았던 열풍건조기의 크기는 길이가 10 m, 최대 이송속도는 20 m/min 이다. 크기를 1/3으로 축소한 본 실증용 설비에서는 이송속도가 최대 20 m/min 까지 가능하여 건조 성능이 2배 이상으로 크게 향상되는 것으로 나타났다. 그리고 건조기로부터 발생하는 톨루엔을 회수하여 촉매버너의 연료로 다시 사용함으로써, 톨루엔의 처리에 드는 비용을 절약할 수 있으며 톨루엔이 가지고 있는 열을 회수함으로써 에너지 절약의 2중의 효과를 얻을 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 섬유 코팅 건조기에 저온 촉매버너를 적용하기 위하여 LPG용 촉매버너의 연소특성과 톨루엔을 사용하였을 때의 연소특성을 파악하였다. 촉매버너를 사용한 실증용 건조기에 대하여 실험하여 아래와 같은 결과를 도출하였다.

(1) 확산식 촉매버너는 설치 방법에 따라서 연소성능이 차이가 났으며 수평하향으로 설치 시에는 연소성능이 크게 감소하여 이의 개선이 필요하였다.

(2) 촉매버너를 수평하향으로 설치하고 연소용

공기를 촉매표면에 강제적으로 공급하였을 때 연소효율은 개선되었으며, 열부하 1.0 kcal/h.cm^2 에서 공기 공급량이 이론공기량의 3배 이상이 되면 완전 연소가 가능하였다.

(3) 확산식 촉매버너를 예혼합식 촉매버너로 바꾸었을 때, 100 % 연소효율은 가능하였으나, 촉매층의 온도가 촉매의 내열온도($700 \text{ }^\circ\text{C}$) 이상으로 증가하여 실용적으로 사용할 수 있는 조건이 매우 제한적이었다.

(4) 파이버매트 촉매버너에 톨루엔 혼합기를 예혼합방식으로 연소하였을 때, 공간속도 4000 h^{-1} 이하, 톨루엔 농도 4000 ppm 이상에서 완전 연소가 가능하였다.

(5) 촉매버너를 사용하는 건조기에서 섬유의 건조 속도는 기존의 열풍건조 방식보다 2배 이상 증가하여, 건조기로부터 발생하는 톨루엔을 회수하여 촉매버너의 연료로 다시 사용하게 됨으로서 에너지절약과 공해방지의 2중의 효과를 얻을 수 있었다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지원으로 수행한 “건조 공정용 촉매연소 시스템 개발 연구”의 일부이며 이에 관계자 여러분들에게 감사의 마음을 표합니다.

참고문헌

- (1) 貞森博己, 濶井和夫, “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.
- (2) Radcliffe, S. W. and Hickman, R. G., 1975, “Diffusive catalytic combustors”, J. of the Institute of Fuel, pp. 208-214.
- (3) Trimm, D. L. and Lam, Chi-Wai, 1980, “The combustion of methane on platinum-alumina fiber catalyst-II”, Chemical Engineering Science, Vol. 35, pp. 1731-1739.
- (4) 이진복, 서용석, 강성규, 류청걸, 송광섭, 류인수, 1995, “가열(건조)공정에 대한 촉매버너의 에너지절약 효과”, 제10회 에너지절약기술워크샵 논문집, pp.203-218.
- (5) 강성규, 류청걸, 서용석, 송광섭, 류인수, 1995, “수평형 촉매연소 건조기용 촉매체 제조 및 건조기 개발 실용화 연구”, 한국에너지기술 연구소, pp.45-58.
- (6) 강성규, 류청걸, 서용석, 송광섭, 류인수, 1995, “수평형 촉매연소 건조기용 촉매체 제조 및 건조기 개발 실용화 연구”, 한국에너지기술 연구소, pp.59-70.
- (7) 전학제, 1992, “촉매개론”, 도서출판 한림원, pp. 192-210.
- (8) 강성규, 김종원, 이상호, 명광식, 박기배, 1997, “폐가스순환형 촉매연소 건조기 개발 연구-TSA 설계 및 운전기술 개발”, 한국에너지 기술연구소.