

# 악취가스 및 휘발성 유기 화합물 산화를 위한 백금계 촉매의 코팅 방법에 관한 연구

신중훈 · 정민기 · 홍성창\*,†

경기대학교 일반대학원 환경에너지공학과, \*경기대학교 환경에너지공학과  
(2021년 7월 27일 접수, 2021년 8월 4일 수정, 2021년 8월 6일 채택)

## A Study on the Coating Method of Platinum based Catalyst for Odor Gas and VOCs Oxidation

Jung Hun Shin, Min Gie Jung and Sung Chang Hong\*,†

Department of Environmental Energy Engineering, Graduate school of Kyonggi University, Gyeonggi-do 16227, Korea

\*Department of Environmental Energy Engineering, Kyonggi University, Gyeonggi-do 16227, Korea

(Received July 27, 2021; Revised August 4, 2021; Accepted August 6, 2021)

### 초 록

본 연구에서는 악취가스 및 휘발성 유기 화합물을 산화 제거하기 위한 백금/티타니아를 허니컴 및 메탈폼 담체에 코팅하는 방법을 확인하였다. 다양한 방법 중 파우더 코팅과 나노 코팅에 대한 비교를 수행하였다. SEM/EDX (Scanning Electron Microscopy/Energy Dispersive X-ray spectroscopy) 분석은 허니컴 및 메탈폼의 표면 상태 및 노출된 백금 성분비를 조사하는데 사용되었다. 또한, 촉매 코팅 방법에 따른 톨루엔, 트리메틸아민, 아이소프로필 알코올의 제거 성능을 비교하였다.

### Abstract

In this study, different methods to coat honeycomb and metal foam substrate with platinum/titania for removing odor gases and volatile organic compounds were investigated. Among them, the powder coating and the nano coating were compared. Scanning electron microscopy/energy dispersive X-ray spectroscopy (SEM/EDX) analysis was used to investigate the surface conditions and exposed platinum composition ratios on honeycomb and metal foam. Also, the catalytic oxidation performance of toluene, trimethylamine and isopropyl alcohol was compared according to the coating method.

**Keywords:** Odor compound, Oxidation, Platinum, Coating method, Substrate

## 1. 서 론

최근 산업화에 따른 다양한 환경문제 중에서 악취는 보편적인 민원 대상이 되고 있다. 이러한 악취 유발 물질은 단순히 불쾌감 또는 혐오감을 느끼게 할 뿐만 아니라 휘발성 유기 화합물과 함께 배출되는 문제가 있다. 휘발성 유기 화합물의 경우 대기 중에서 광화학반응을 통해 오존을 생성하며, 생성된 오존은 질소산화물 등과 반응하여 2차적 초미세먼지를 생성하기 때문에 인체의 건강에 영향을 미칠 수 있다. 이러한 악취가스를 배출하는 시설로는 주로 화학공장, 정유공장, 매립장, 분뇨 및 축산폐수처리장, 하수처리장, 반도체 제조공장 등이 있다. 이러한 시설에서 배출되는 악취물질로는 대표적으로 황화수소, 암모니아, 아민류 등이 있다[1,2]. 우리나라의 경우 악취방지법을 통하여

배출되는 악취 유발 물질의 농도 허용 기준을 지정하였으며, 매 5년마다 악취물질 배출 시설에 대한 배출기준 준수 여부를 확인하기 위한 진단 의무화를 실시하고 있다. 악취가스 및 휘발성 유기 화합물을 제거하기 위한 방법으로는 흡착, 습식세정법, 토양탈취법, 냉각응축법, 연소법, 바이오필터 등이 이용되고 있다[3-5]. 특히 연소법의 경우 일반적으로 휘발성 유기 화합물 및 악취가스를 특정 온도에서 연소하여 제거하는 방법으로 사용되고 있다. 연소법은 직접연소법(Thermal Oxidation, TO), 촉매산화연소법(Catalytic Thermal oxidation, CTO), 축열연소법(Regenerative Thermal Oxidation, RTO)으로 구분할 수 있다[6]. 직접연소법 및 축열연소법은 약 800~900 °C의 연소온도에서 대상 물질을 제거하기 때문에 요구 온도가 높다. 촉매산화연소법은 500 °C 이하의 온도에서 악취물질의 제거가 가능하기 때문에 연료소비량 및 thermal NOx의 생성을 억제할 수 있다는 장점이 있으나, 악취가스를 제거하기 위한 촉매의 비용이 높다는 단점이 있다. 축열연소법과 촉매산화연소법을 조합한 방식인 축열식 촉매 연소법(Regenerative Catalytic Oxidation, RCO)은 200~500 °C의 연소온도에서 오염 물질을 제거 가능하며, 연소 시 발생하는 열을 열교환용 축열재를

† Corresponding Author: Kyonggi University  
Department of Environmental Energy Engineering, Gyeonggi-do 16227, Korea  
Tel: +82-31-249-9743 e-mail: schong@kyonggi.ac.kr

이용하여 회수할 수 있으므로 에너지 절약이 가능한 기술로 평가되고 있다[7,8]. 따라서 향후 촉매를 이용한 연소법의 경제적이고 효과적인 악취가스 제거를 위해서는 저온에서 우수한 성능을 갖는 촉매의 개발이 시급한 실정이다.

이에 본 연구에서는 산화 성능이 우수하며 경제적인 촉매의 제조방법을 제안하기 위한 연구를 수행하였다. 악취방지시설에서 상용되는 귀금속계 촉매는 허니컴 담체(honeycomb substrate)에 분말 용액을 파우더 코팅하여 제조되고 있다. 본 연구에서는 졸(sol) 형태의 백금(Pt)과 이산화티탄(TiO<sub>2</sub>)를 담체에 직접 코팅하여 촉매를 제조하였으며, 상용 촉매와 코팅성 및 산화 성능을 비교하였다. 이때 촉매의 성능은 악취가스 및 휘발성 유기화합물의 대표적 물질인 톨루엔, 트리메틸아민, 아이소프로필 알코올의 산화를 통한 제거율로 확인하였다. 추가로 메탈폼 담체(metal foam substrate)에 대한 코팅 방법에 따른 영향을 판단하기 위하여 코팅성 및 산화 성능을 확인하여 최적의 촉매 코팅 방법을 제안하였다.

## 2. 실험

### 2.1. Pt/TiO<sub>2</sub> 분말 제조

본 연구에서 사용된 Pt/TiO<sub>2</sub> 분말은 습윤 함침법을 이용하여 제조되었다. 활성금속으로 사용된 백금의 전구체는 수산화 백금(Pt(OH)<sub>2</sub>, SNS Co.)을 사용하였으며, 지지체는 비결정질의 이산화티탄(TiO<sub>2</sub>, Millennium Co.)를 사용하였다. 전구체를 제외한 순수 활성금속 함량은 이산화티탄에 대한 5 wt.%로 계산되었다. 계산된 수산화백금은 정량된 지지체에 수용액에 혼합하였으며, 슬러리 형태의 혼합용액은 1 h 이상 교반되었다. 회전진공증발기(Eyela Co. N-N series)를 사용하여 65 °C, 65 mmHg의 조건에서 혼합용액의 수분을 제거하였고, 미세 기공에 남아있는 수분을 완전히 제거하기 위하여 105 °C 오븐에서 24 h 이상 건조하였다. 건조된 파우더는 공기 분위기에서 10 °C/min의 승온 속도로 400 °C 4 h 동안 소성되었으며, 10% H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> 분위기에서 10 °C/min의 승온 속도로 600 °C 1 h 동안 환원되었다.

### 2.2. 촉매 코팅 방법

본 연구에서 담체에 촉매를 코팅하기 위한 방법으로 파우더 코팅(powder coating) 방법과 나노 코팅(nano coating) 방법을 이용하였다. 파우더 코팅은 슬러리(slurry) 용액에 허니컴 또는 메탈폼 담체를 수직으로 담고 빼내면서 수행하였다. 코팅에 사용된 슬러리 용액은 ball milling을 이용하여 제조되었다. Ball milling 장치는 지르코니아(ZrO<sub>2</sub>, Aldrich Co.) 재질의 ball을 5 mm, 10 mm, 20 mm 크기로 준비하였으며, 2 L 용량의 jar를 사용하였다. 이 때 ball과 촉매 파우더의 비율은 50:1로 하였으며, 증류수와 촉매의 비율은 1:3으로 고정하였다. 또한 회전 속도는 366 rpm으로 고정하여 3 hr동안 유지하였다. 이후 ball mill된 슬러리 용액은 100 cc 비커에 옮겨졌다. 코팅되는 촉매의 양은 허니컴 또는 메탈폼 담체의 부피 당 활성금속의 중량(g/L)을 기준으로 하였으며, 코팅 후 dry oven에서 건조된 담체의 무게에서 코팅 전 담체의 무게를 빼준 값으로 확인하였다. 목표한 중량만큼 코팅된 담체는 dry oven에서 12 h 건조 후 소성로에서 공기 분위기로 400 °C 4 h 동안 소성하였다. 파우더 코팅 방법을 도식화한 내용은 Figure 1에 나타내었다.

나노 코팅은 허니컴 또는 메탈폼 담체를 졸 형태의 백금과 이산화티탄에 순차적으로 담고 빼내면서 수행하였다. 코팅에 사용된 백금의 전구체는 수산화 백금(Pt(OH)<sub>2</sub>, SNS Co.)를 사용하였다. 이산화티

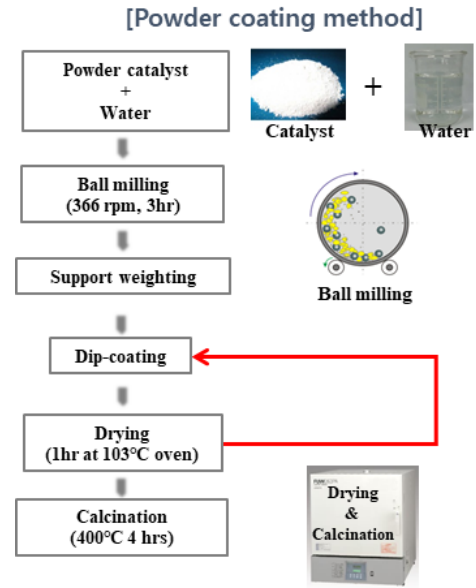


Figure 1. Flow diagram for the preparation of powder coating catalyst.

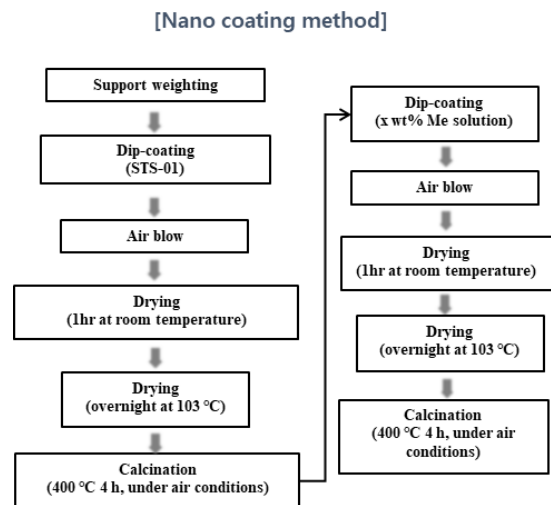


Figure 2. Flow diagram for the preparation of nano coating catalyst.

탄은 입자 크기가 약 7 nm이며, 액체 중에 입자가 분산된 졸(sol) 형태로 존재하는 STS-01 (TiO<sub>2</sub>, Ishihara Co.)을 사용하였다. 코팅 방법으로는 허니컴 또는 메탈폼 담체를 STS-01에 수직으로 담고 빼낸 후에 에어 콤프레샤를 이용하여 붙여주었다. 이후 1 h 동안 상온에서 건조 후 dry oven에서 12 h 동안 건조하고, 공기 분위기로 400 °C 4 h 동안 소성하여 담체 표면에 TiO<sub>2</sub>를 코팅한다. 이후 TiO<sub>2</sub>가 코팅된 담체에 백금을 담지하기 위하여 위와 동일한 방법으로 수산화 백금에 코팅하였다. 코팅되는 백금의 양은 허니컴 또는 메탈폼 담체의 부피 당 활성금속의 중량(g/L)을 기준으로 하였으며, 코팅 후 dry oven에서 건조된 담체의 무게에서 코팅 전 담체의 무게를 빼준 값으로 확인하였다. 목표한 중량만큼 코팅된 담체는 dry oven에서 12 h 건조 후 소성로에서 공기 분위기로 400 °C 4 h 동안 소성하였다. 나노 코팅 방법을 도식화한 내용은 Figure 2에 나타내었다.

2.3. 허니컴 코팅 촉매

본 연구에서 허니컴 실험은 파우더 코팅된 상용촉매와 나노 코팅된 백금계 촉매의 성능을 비교하기 위하여 수행되었다. 파우더 형태로 코팅된 상용촉매는 특정 기업으로부터 제공받았다. 사용된 허니컴 담체는 200 cpsi의 코디어라이트 재질의 허니컴(Ceracomb Co.)을 사용하였다. commercial A는 활성금속으로 백금이 1.78 g/L 코팅되었으며, commercial B는 활성금속으로 루테튬(Ru)-백금이 각각 1.6, 0.12 g/L 코팅되었다. 나노 코팅된 촉매의 경우 활성금속으로 백금이 1.0 g/L 코팅되었으며, Pt/STS-01 (H, 1.0 g/L)로 명명하였다. 여기서 H는 허니컴 담체를 의미하며, 1.0 g/L는 허니컴 담체에 코팅된 백금의 양을 의미한다.

2.4. 메탈폼 코팅 촉매

본 연구에서 메탈폼 촉매의 실험은 파우더 코팅된 촉매와 나노 코팅된 촉매의 성능을 비교하기 위하여 수행되었다. 사용된 메탈폼의 기공 사이즈는 3,000 μm를 갖는 샘플을 담체로 사용하였다. 파우더 코팅에 사용된 분말은 2.1에서 제조된 Pt/TiO<sub>2</sub>를 사용하였으며, 활성금속으로 백금이 각각 0.54, 1.76 g/L가 되도록 코팅하였다. 나노 코팅된 촉매의 경우 활성금속으로 백금이 각각 0.25, 0.50 g/L 코팅되었다. 여기서 파우더 코팅된 촉매는 Pt/TiO<sub>2</sub> (M, xg/L)로 명명하였으며, 나노 코팅된 촉매는 Pt/STS-01 (M, xg/L)로 명명하였다. 여기서 M은 메탈폼 담체를 의미하며, x g/L는 메탈폼 담체에 코팅된 백금의 양을 의미한다.

2.5. 실험장치 및 방법

본 연구에서 악취가스 산화 실험에 사용된 실험장치의 모식도는 Figure 3에 나타내었다. 반응기에 공급되는 가스는 질소(N<sub>2</sub>), 산소(O<sub>2</sub>), 톨루엔(C<sub>7</sub>H<sub>8</sub>), 트리메틸아민(C<sub>3</sub>H<sub>9</sub>N), 아이소프로필 알코올(C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>O)을 사용하였으며, 가스의 유량은 가스질량유량계(mass flow controller; MFC)를 사용하여 조절하였다. 주입되는 가스는 180 °C로 가열된 pre-heater에서 혼합하여 반응기로 공급되었다. 수분은 H<sub>2</sub>O bubbler에 질소를 통과시켜 주입되었으며, 수분을 일정하게 주입하기 위하여 bubbler의 온도를 40 °C로 유지하였다. 촉매 반응기는 내경 12 mm, 높이 650 mm인 석영관을 사용하였고, 촉매는 석영솜을 이용하여 고정하였다. 반응 온도는 촉매 상부에서 열전대를 이용하여 측정하였으며, 온도를 150~450 °C로 제어하였다.

본 연구에서 모든 촉매의 공간속도는 50,000 hr<sup>-1</sup>으로 고정하였다. 반응가스 중 톨루엔, 트리메틸아민, 아이소프로필 알코올의 농도는 각각 170, 20, 173 ppm으로 고정하였고, 개별적으로 주입하여 실험하였다. 반응가스 내 산소의 농도는 15 vol.%로 하였으며, 수분의 농도는 8 vol.%로 하였고, 총 유량을 500 cc/min으로 공급하였다. 산화 실험 450 °C에서 30 min간 촉매를 15% O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> 분위기로 전처리하여 산화상태를 균일하게 유지하도록 하였다. 이후 반응 가스를 주입하여 실험을 수행하였으며, 농도가 일정해질 때까지 실험을 지속하였다. 모든 가스의 초기 농도는 500 °C로 가열된 산화탑에서 이산화탄소로 완전히 산화하여 계산하였으며, 이산화탄소의 농도는 비분산 적외선 가스 분석기(ZKJ-2, Fuji Electric Co.)를 이용하여 측정하였다. 모든 반응의 전환율(conversion)은 아래의 식으로 계산되었으며, C<sub>inletCO2</sub>는 산화탑에서 측정된 CO<sub>2</sub> 농도이고, C<sub>outletCO2</sub>는 반응탑에서 측정된 CO<sub>2</sub>의 농도를 의미한다.

$$Conversion(\%) = \frac{C_{inletCO2} - C_{outletCO2}}{C_{inletCO2}} \times 100 \quad (1)$$

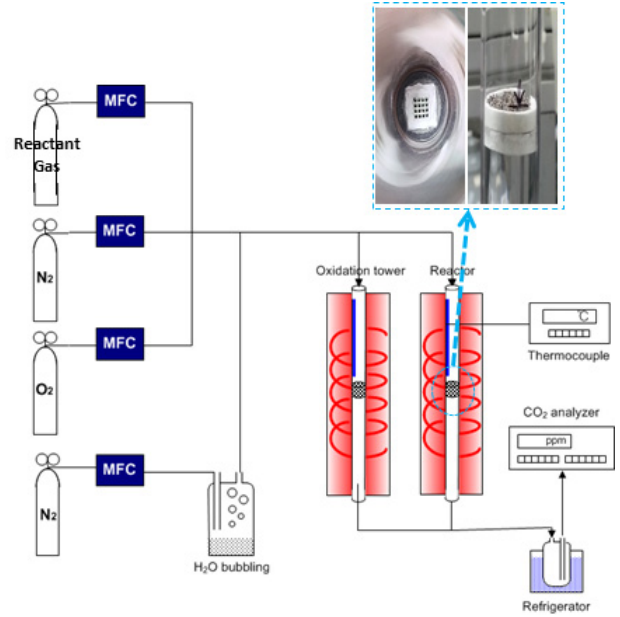


Figure 3. Schematic diagram of experimental equipment.

2.6. 촉매 특성분석

2.6.1. SEM/EDX (Scanning Electron Microscopy/Energy Dispersive X-ray spectroscopy)

담체에 코팅된 촉매의 표면 상태 및 성분을 조사하기 위하여 JEOL사의 JSM-6599F를 이용하여 SEM/EDX 분석을 수행하였다. 실험 방법으로는 샘플로 입사된 전자가 방전되지 않을 경우를 대비하여 백금으로 미리 전도성 코팅을 하였다. SEM 분석 시 가속전압은 15 KV로 하였으며, 수분 및 산소분자를 제거하기 위하여 9.63 × 10<sup>-5</sup> Pa의 진공도를 가진 유확산 펌프를 사용하여 전자총, 경통과 시편실의 진공을 유지하였다. 또한, EDX로 C, O, Ti, Pt, Si 등의 원소성분들을 대상으로 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 코팅 방법에 따른 촉매의 코팅성 평가

본 연구에서는 코팅 방법에 따른 허니컴 또는 메탈폼 촉매 표면의 코팅성을 비교하였다. Figure 4는 허니컴 담체에 파우더 코팅된 commercial A와 나노 코팅된 Pt/STS-01 (H, 1.0 g/L)의 표면 코팅성 비교를 위한 SEM/EDX 분석 결과이다. Figure 4(a)에 나타낸 commercial A 촉매의 표면 이미지 결과에서 허니컴 담체에 촉매 분말을 2~3차례 코팅함에 따라 담체 표면에 약 200 μm의 촉매층이 생성된 것을 확인할 수 있었다. 또한, 해당 부분에 대하여 point EDX 분석을 수행함에 따라 촉매층 표면에 존재하는 백금이 전체 성분의 6.22% 만큼 존재하는 것을 확인하였다. Figure 4(b)에 나타낸 Pt/STS-01 (H, 1.0 g/L)의 표면 이미지 결과에서 나노 코팅된 촉매는 허니컴 담체의 표면에 얇은 두께로 존재하는 것을 확인할 수 있었다. 뿐만 아니라, 촉매층에 대하여 point EDX 분석을 수행하였을 때 표면에 존재하는 백금이 전체 성분의 11.57%만큼 존재하는 것을 확인할 수 있었다. 나노 코팅된 Pt/STS-01 (H, 1.0 g/L)의 경우 코팅된 백금의 양이 1.0 g/L로 commercial A (1.78 g/L)에 비하여 더 낮음에도 불구하고 담체 표면에 존재하는 백금의 구성이 더 높은 것을 확인할 수 있었다.

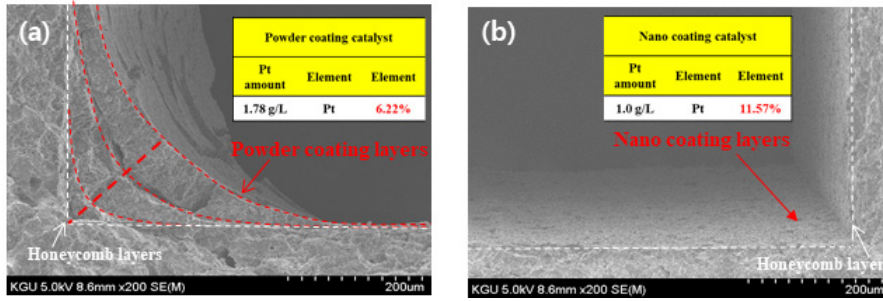


Figure 4. FE-SEM/EDX photograph of honeycomb coated catalyst(a) powder coating catalyst, (b) nano coating catalyst.

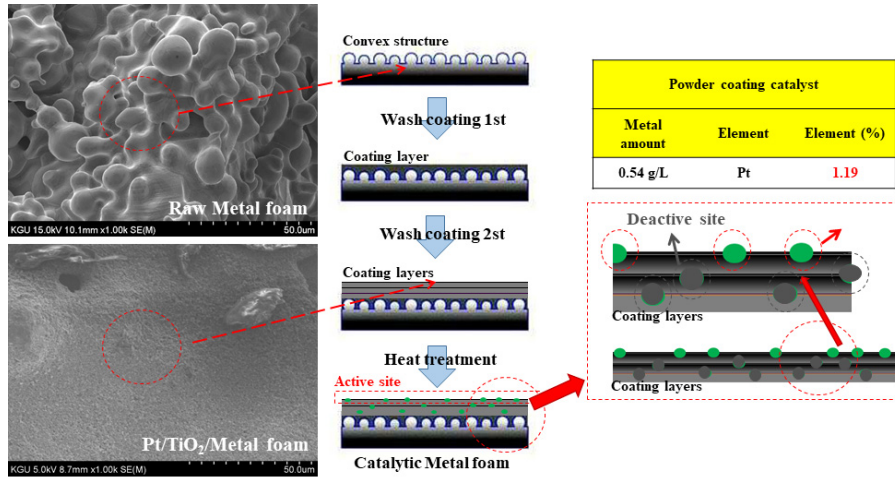


Figure 5. FE-SEM/EDX photograph of powder coated metal foam catalyst.

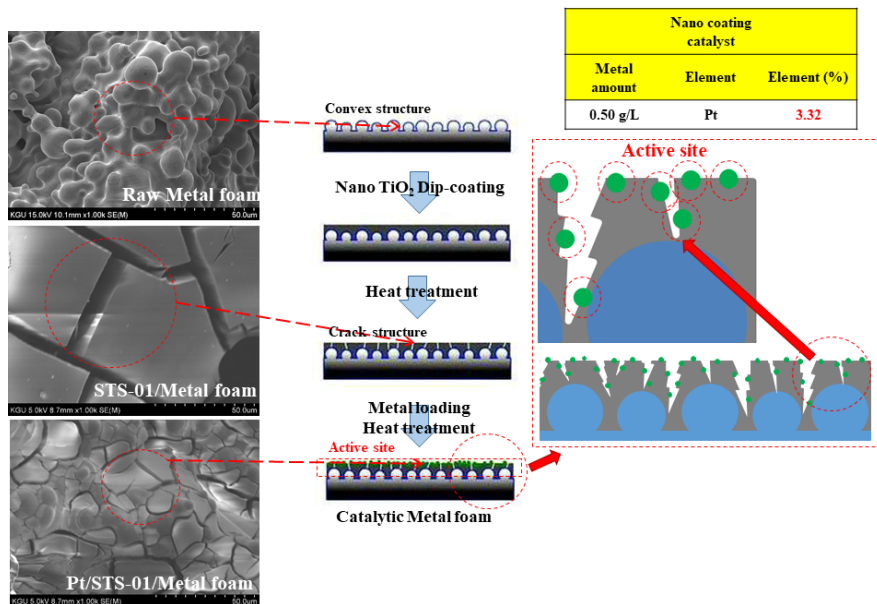


Figure 6. FE-SEM/EDX photograph of nano coated metal foam catalyst.

메탈폼의 경우 넓은 비표면적을 가지며, 축열기에서 고온을 접촉시켜 현열을 축적하기 위한 매체로 사용될 수 있다[9,10]. 따라서 본 연구에서는 메탈폼 담체에 촉매를 코팅하기 위한 방법에 따른 담체 표면의 코팅성을 비교하였다. Figure 5는 메탈폼 담체에 Pt/TiO<sub>2</sub> 분말을 파우더 코팅한 Pt/TiO<sub>2</sub> (M, 0.54 g/L)의 표면 코팅성 확인을 위한

SEM/EDX 분석 결과이다. 파우더 코팅 전 raw metal foam 표면을 확인한 결과 약 16 μm의 지름을 갖는 구 형태의 구조로 존재하는 것을 확인할 수 있었다. 해당 담체에 촉매 분말을 2차례 파우더 코팅한 Pt/TiO<sub>2</sub>/Metal foam 표면에서는 분말이 표면을 덮어 구 형태의 구조를 더 이상 확인할 수 없었다. 또한, 담체에 코팅된 분말의 표면은 매끄

러운 형태로 존재하는 것을 확인할 수 있었다. Figure 6은 메탈폼 담체에 나노 코팅된 Pt/STS-01 (M, 0.50 g/L)의 표면 코팅성 확인을 위한 SEM/EDX 분석 결과이다. 메탈폼 담체 표면에 STS-01을 이용하여 나노 코팅한 STS-01/Metal foam의 이미지를 통하여 TiO<sub>2</sub>가 담체 표면에 덮여있는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 파우더 코팅과는 다르게 표면에 크랙(crack)이 생성되는 것을 확인할 수 있었다. 해당 담체 표면에 수산화 백금을 이용하여 활성금속을 코팅한 Pt/STS-01/Metal foam의 이미지를 통하여 담체 표면에 촉매가 코팅되어 있는 것을 확인할 수 있었으며, 여전히 수많은 크랙이 존재하는 것을 확인할 수 있었다. 파우더 코팅 촉매와 나노 코팅 촉매에 point EDX 분석을 수행하여 표면에 존재하는 백금의 구성 비율을 확인한 결과 Pt/TiO<sub>2</sub>(M, 0.54g/L)는 전체 성분의 1.19% 만큼 존재하는 것을 확인할 수 있었으며, Pt/STS-01(M, 0.50g/L)는 전체 성분의 3.32%로 존재하는 것을 확인하였다. 두 촉매는 거의 동일한 양의 백금이 코팅되어 있음에도 불구하고 Pt/STS-01(M, 0.50g/L)의 표면에 더 많은 백금이 노출되어 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 나노 코팅 시 생성되는 크랙으로 인하여 비표면적이 더욱 증가함에 따라 나타나는 현상으로 추측된다.

3.2. 코팅 방법에 따른 촉매의 산화 성능

앞선 결과에서는 촉매 코팅 방법에 따른 허니컴과 메탈폼 촉매 표면의 코팅성을 비교하였으며, 나노 코팅된 촉매의 경우 파우더 코팅된 촉매에 비하여 표면에 더욱 많은 비율의 백금이 노출되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 본 절에서는 허니컴 및 메탈폼 담체에 코팅 방법에 따른 촉매 성능을 비교하기 위한 연구를 수행하였다. 허니컴 및 메탈폼 촉매는 공간속도 50,000 hr<sup>-1</sup>에서 실험을 수행하였으며, 주입되는 톨루엔의 농도는 170 ppm으로 고정하였다. Figure 7은 코팅 방법에 따른 허니컴 촉매와 메탈폼 촉매의 톨루엔 산화 실험 결과를 나타낸 그래프이다. Figure 7(a)는 허니컴 담체에 파우더 코팅된 commercial A, commercial B와 나노 코팅된 Pt/STS-01 (H, 1.0 g/L)의 톨루엔 산화 성능을 나타내었다. commercial A와 Pt/STS-01 (H, 1.0 g/L)은 250 °C 이상의 온도에서 90% 이상의 톨루엔 산화 성능을 나타내었으며, commercial B의 경우 400 °C 이상의 온도에서 90% 이상의 성능을 나타내었다. Pt/STS-01 (H, 1.0 g/L)는 commercial A와 commercial B에 비하여 백금 코팅량이 더 낮음에도 불구하고 가장 우수한 톨루엔 산화 성능을 나타내었다. Figure 7(b)는 메탈폼 담체에 파우더 코팅된 Pt/TiO<sub>2</sub> (M, 0.54 g/L), Pt/TiO<sub>2</sub> (M, 1.76 g/L)와 나노 코팅된 Pt/STS-01 (M, 0.25 g/L), Pt/STS-01 (M, 0.25 g/L)의 톨루엔 산화 성능을 나타내었다. 메탈폼 담체에 코팅된 모든 촉매는 250 °C 이상의 온도에서 80% 이상의 톨루엔 산화 성능을 나타내었다. 특히, Pt/TiO<sub>2</sub> (M, 1.76 g/L)와 Pt/STS-01 (M, 0.50 g/L)는 가장 우수한 산화 성능을 나타내었다. 그러나 두 촉매의 경우 백금 코팅량이 약 3배 이상 차이이기 때문에 나노 코팅 시 톨루엔 산화 성능이 더 우수한 것으로 판단된다.

Figure 8은 코팅 방법에 따른 허니컴 촉매와 메탈폼 촉매의 트리메틸아민 산화 실험 결과를 나타낸 그래프이다. 반응기에 주입되는 트리메틸아민의 농도는 20 ppm으로 고정하였다. Figure 8(a)는 허니컴 담체에 코팅된 촉매의 코팅 방법에 따른 트리메틸아민 산화 성능을 나타내었다. 250 °C에서 commercial A와 commercial B는 각각 80.64%, 77.42%의 트리메틸아민 산화 성능을 나타내었으며, 450 °C에서 각각 87.09%와 91.93%의 산화 성능을 나타내었다. 반면 Pt/STS-01 (H, 1.0 g/L)의 경우 250 °C와 450 °C에서 각각 90.32%와 100%를 나타내었다. 따라서 Pt/STS-01 (H, 1.0 g/L)는 낮은 백금 코팅량으로 commercial A와 commercial B에 비하여 우수한 산화 성능을

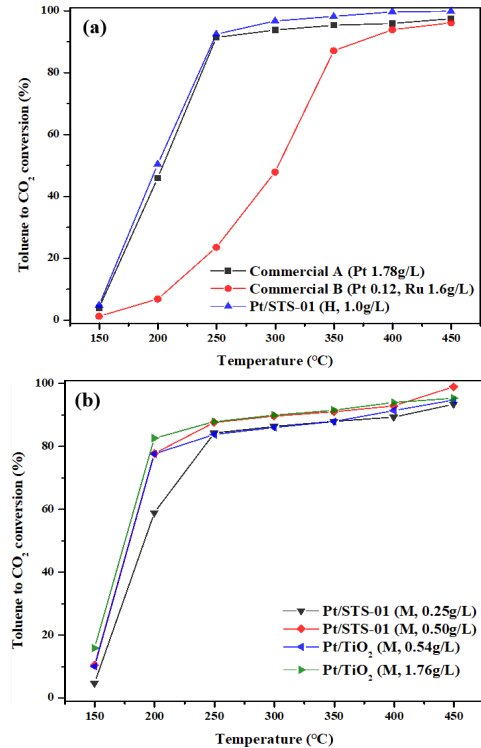


Figure 7. The effect of coating method on Toluene oxidation reaction (a) honeycomb catalyst, (b) metal foam catalyst.

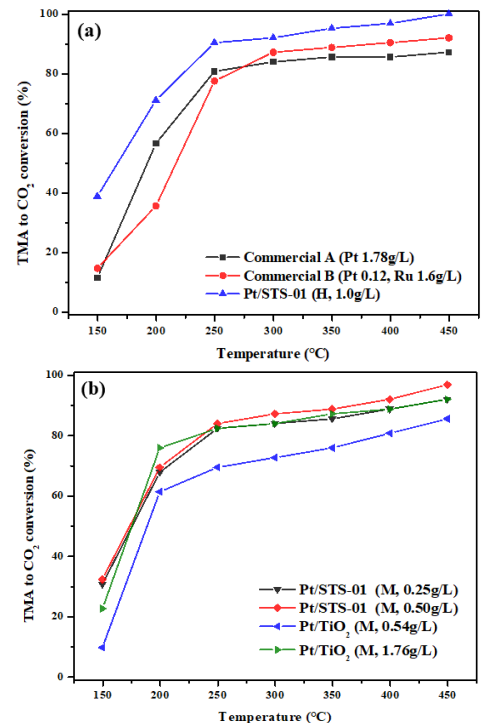


Figure 8. The effect of coating method on trimethylamine oxidation reaction (a) honeycomb catalyst, (b) metal foam catalyst.

나타내었다. Figure 8(b)는 메탈폼 담체에 코팅된 촉매의 트리메틸아민 산화 성능을 나타내었다. Pt/TiO<sub>2</sub> (M, 0.54 g/L)를 제외한 모든 촉

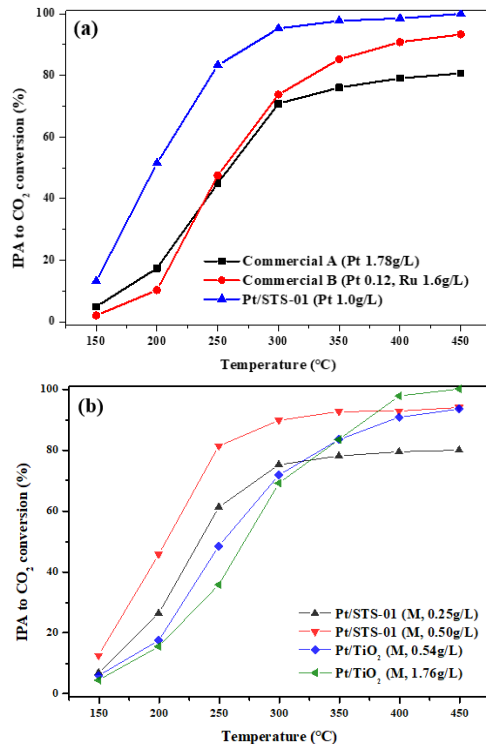


Figure 9. The effect of coating method on isopropyl alcohol oxidation reaction (a) honeycomb catalyst, (b) metal foam catalyst.

는 250 °C 이상의 온도에서 80% 이상의 제거 성능을 나타내었다. Pt/TiO<sub>2</sub> (M, 1.76 g/L)는 Pt/STS-01 (M, 0.25 g/L)와 백금 코팅량이 약 7배 많았으나, 동일한 트리메틸아민 산화 성능을 나타내었다. 또한, Pt/STS-01 (M, 0.50 g/L)는 Pt/TiO<sub>2</sub> (M, 0.54 g/L)와 백금이 동일한 양으로 코팅되었으나 250 °C 이상에서 약 15% 더 높은 제거율을 나타내었다.

Figure 9는 코팅 방법에 따른 허니컴 촉매와 메탈폼 촉매의 아이소프로필 알코올 산화 실험 결과를 나타낸 그래프이다. 반응기에 주입되는 아이소프로필 알코올의 농도는 173 ppm으로 고정하였다. Figure 9(a)는 코팅 방법에 따른 허니컴 촉매의 아이소프로필 알코올 산화 성능을 나타내었다. Commercial A와 Commercial B는 250 °C에서 각각 45.02%, 47.51%의 산화 성능을 나타내었으며, 450 °C에서 각각 80.65%, 93.29%의 제거율을 나타내었다. 반면 Pt/STS-01 (H, 1.0 g/L)의 경우 250 °C와 450 °C에서 각각 83.33%와 100%의 제거율을 나타내었다. 해당 결과를 통하여 Pt/STS-01 (H, 1.0 g/L)는 상용 촉매에 비하여 백금의 코팅량이 낮음에도 불구하고 우수한 아이소프로필 알코올 산화 성능을 갖는 것을 확인하였다. Figure 9(b)는 메탈폼 담체에 코팅된 촉매의 아이소프로필 알콜 산화 성능을 나타내었다. Pt/TiO<sub>2</sub> (M, 0.54 g/L)와 Pt/TiO<sub>2</sub> (M, 1.76 g/L)는 450 °C에서 산화 성능이 각각 93.33%와 100%로 우수하였으나, 온도가 감소함에 따라 산화 성능이 급격히 감소하는 것을 확인하였다. 이후 250 °C에서 두 촉매의 성능은 각각 48.33%와 35.66%를 나타내었다. 반면에 Pt/STS-01 (M, 0.25 g/L)와 Pt/STS-01 (M, 0.50 g/L)의 산화 성능은 450 °C에서 각각 79.88%, 93.87%로 파우더 코팅 촉매에 비하여 낮았으나, 250 °C에서 각각 61.11%, 81.23%로 우수한 산화 성능을 나타내었다. 특히, Pt/STS-01 (M, 0.50 g/L)의 경우 넓은 온도 범위에서 가장 높은 산화 성능을 나타내었다.

해당 결과를 통하여 허니컴과 메탈폼 담체에서 나노 코팅된 촉매는 톨루엔, 트리메틸아민, 아이소프로필 알코올에 대하여 우수한 산화 성능을 나타내는 것을 확인하였다. 또한 나노 코팅 촉매의 경우 파우더 코팅 촉매에 비하여 적은 양의 백금이 코팅되더라도 우수한 성능을 나타내는 것을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 나노 코팅을 통하여 경제적이면서 산화 성능이 우수한 촉매 제조 방법을 제안할 수 있었다.

## 4. 결 론

본 연구는 허니컴 및 메탈폼 담체에 악취가스 및 휘발성 유기 화합물을 산화 제거하기 위한 백금/티타니아 촉매를 코팅하는 방법에 대하여 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 함침법을 이용하여 제조된 촉매 분말을 허니컴 및 메탈폼 담체 코팅 하는 파우더 코팅 방법과 졸 형태의 이산화티탄과 백금 전구체를 담체에 코팅하는 나노 코팅 방법을 비교하였다. SEM/EDX 분석 결과 허니컴 담체의 경우 파우더 코팅된 촉매는 표면에 촉매층이 두껍게 생성되어 백금의 노출이 적었으나, 나노 코팅된 촉매의 경우 표면에 매끄럽고 백금의 노출이 많은 것을 확인할 수 있었다. 메탈폼 담체의 경우에도 동일한 양의 백금을 코팅하였음에도 나노 코팅 촉매의 표면에 더 많은 백금이 노출됨에 따라 파우더 코팅된 촉매는 표면에 파우더가 쌓이면서 불활성화 되는 활성점이 존재하는 것을 추측할 수 있었다. 대표적 악취가스 및 휘발성 유기 화합물인 톨루엔, 트리메틸아민, 아이소프로필 알코올에 대하여 산화 제거 실험을 수행한 결과 허니컴 및 메탈폼 담체에 나노 코팅된 촉매가 파우더 코팅 촉매에 비하여 더 적은 백금 코팅량으로 우수한 산화 성능을 나타내었다. 이러한 결과를 토대로 나노 코팅 방법은 파우더 코팅 방법에 비하여 백금의 사용량이 적어 경제적이면서, 악취가스 및 휘발성 유기 화합물 산화 성능이 우수한 것을 확인하였다.

## 감 사

본 연구는 2021학년도 경기대학교 대학원 연구원장학생 장학금 지원에 의하여 수행되었음.

## References

1. M. Govindan and I. S. Moon, A single catalyst of aqueous Co<sup>III</sup> for deodorization of mixture odor gases: A development and reaction pathway study at electro-scrubbing process, *J. Hazard. Mater.*, **260**, 1064-1072 (2013).
2. Y. Han, Y. Wang, F. Chai, J. Ma, and L. Li, Biofilters for the co-treatment of volatile organic compounds and odors in a domestic waste landfill site, *J. Clean Prod.*, **277**, 124012 (2020).
3. D. Kasperczyk, K. Urbaniec, K. Barbusinski, E. R. Rene, and R. F. Colmenares-Quintero, Application of a compact trickle-bed bio-reactor for the removal of odor and volatile organic compounds emitted from a wastewater treatment plant, *J. Environ. Manage.*, **236**, 413-419 (2019).
4. D. Dobslaw, O. Ortlinghaus, and C. Dobslaw, A combined process of non-thermal plasma and a low-cost mineral adsorber for VOC removal and odor abatement in emissions of organic waste treatment plants, *J. Environ. Chem. Eng.*, **6**, 2281-2289 (2018).
5. R. Auria, A. C. Aycaguer, and J. S. Devanny, Influence of Water content on degradation rates for ethanol in biofiltration, *J. Air Wast Manage. Assoc.*, **48**, 65-70 (2011).

6. M. Tomatis, M. T. Moreira, H. Xu, W. Deng, J. He, and A. M. Parvez, Removal of VOCs from waste gases using various thermal oxidizers: A comparative study based on life cycle assessment and cost analysis in china, *J. Clean Prod.*, **233**, 808-818 (2019).
7. Z. Zhang, Z. Jiang, and W. Shangguan, Low-temperature catalysis for VOCs removal in technology and application: A state-of-the-art review, *Catal. Today*, **264**, 270-278 (2016).
8. J. Yang, Y. Chen, L. Cao, Y. Guo, and J. Jia, Development and Field-scale optimization of a honeycomb zeolite rotor concentrator/recuperative oxidizer for the abatement of volatile organic carbons from semiconductor industry, *Environ. Sci. Technol.*, **46**, 441-446 (2012).
9. F. Barari, E. M. E. Luna, R. Goodall, and R. Woolley, Metal foam regenerators; heat transfer and storage in porous metals, *J. Mater. Res.*, **28**, 2474-2482 (2013).
10. M. Yu, F. Xin, X. Lai, H. Xiao, Z. Liu, and W. Liu, Study of oscillating flows through a novel constructal bifurcation stirling re-generator, *Appl. Therm. Eng.*, **184**, 116413, (2021).

**Authors**

Jung Hun Shin; M.Sc., Doctor's Course, Department of Environmental Energy Engineering, Graduate school of Kyonggi University, Gyeonggi-do 16227, Korea; junghun5242@gmail.com  
 Min Gie Jung; M.Eng., Master's Course, Department of Environmental Energy Engineering, Graduate school of Kyonggi University, Gyeonggi-do 16227, Korea; ryu01053@naver.com  
 Sung Chang Hong; Ph.D., professor, Department of Environmental Energy Engineering, Kyonggi University, Gyeonggi-do 16227, Korea; schong@kyonggi.ac.kr