

액상환원 기반 Pt/TiO₂ 촉매 제조를 이용한 포름알데히드 상온 산화 반응 특성 연구

김재현 · 장영희 · 김거중* · 김성철**,† · 김성수**,†

경기대학교 일반대학원 환경에너지공학과, *한국화학연구원,
**경기대학교 환경에너지공학과
(2023년 11월 8일 접수, 2023년 11월 19일 수정, 2023년 11월 20일 채택)

A Study on the Characteristics of a Pt/TiO₂ Catalyst Prepared by Liquid-Phase Reduction for Formaldehyde Oxidation at Room Temperature

Jae Heon Kim, Younghee Jang, Geo Jong Kim*, Sung Chul Kim**,† and Sung Su Kim**,†

Department of Environmental Energy Engineering, Graduate School of Kyonggi University, Suwon-si 16227, Korea
*Korea Research Institute of Chemical Technology, Daejeon-Si 34114, Korea
**Department of Environmental Energy Engineering, Kyonggi University, Suwon-si 16227, Korea
(Received November 8, 2023; Revised November 19, 2023; Accepted November 20, 2023)

초 록

현대 사회는 일상생활 중 80% 이상을 실내에서 생활하고, 생활수준의 향상으로 실내오염물질 노출에 대한 유익이 필요하다. 본 연구에서는 실내오염물질 중 하나인 포름알데히드(HCHO)를 별도의 빛 또는 열 없이 상온에서 제거할 수 있는 액상환원법 기반 Pt/TiO₂ 촉매의 성능 및 반응 특성을 조사하였다. 활성실험을 통해, 동일한 방법으로 제조된 촉매라도 TiO₂ 종류에 따라 약 40~80%의 서로 다른 활성을 나타냄을 확인하였다. XRD, BET, XPS 분석을 통해 지지체의 입자 크기, 결정구조, 비표면적 및 O/Ti molar ratio를 조사하였고, 지지체 자체의 물성과 성능 간 상관성은 미미함을 확인하였다. HCHO 산화 반응 경로를 조사하기 위해 일산화탄소를 활용한 *In situ* DRIFT 분석과 H₂-TPR을 수행하였다. 그 결과, 촉매의 성능이 활성금속의 산화상태 및 흡착종의 흡탈착 특성에 지배받음을 확인할 수 있었다.

Abstract

Modern society spends more than 80% of its daily life indoors, emphasizing the need for attention to indoor air pollution due to the improvement in living standards. In this study, the performance and reaction characteristics of the Pt/TiO₂ catalysts prepared by liquid-phase reduction for the removal of formaldehyde (HCHO), one of the indoor air pollutants, at room temperature without the need for additional light or heat were investigated. As a result, it showed that catalysts prepared by the same method showed approximately 40~80% various activities depending on the type of TiO₂. XRD, BET, and XPS analyses were performed to investigate the particle size, crystal structure, specific surface area, and O/Ti molar ratio of the support material, and it revealed that the correlation between the properties and performance was insignificant. To explore the oxidation reaction pathway of formaldehyde (HCHO), *in situ* DRIFT analysis using carbon monoxide and H₂-TPR was performed. The results revealed that the performance was demonstrated by the oxidation state of the active metal and the adsorption-desorption characteristics of the adsorbate species.

Keywords: Liquid-phase reduction, Formaldehyde, Pt/TiO₂, Catalyst, Oxidation state

1. 서 론

포름알데히드(HCHO)는 건축자재 중 합판, 가구, 단열재, 등에서 발

생하며 일상생활에서 노출될 수 있는 물질이다. HCHO는 인체 건강에 큰 위협이 되는 것으로 널리 알려져 있다. HCHO에 노출될 경우 눈, 코, 입 등에 점막을 형성하며, 장기적으로 노출 시 설사, 기침, 피부질환, 기억력 상실, 정서불안 등을 야기한다. 또한, 비교적 낮은 농도에서도 인체에 자극성이 강하다[1,2].

HCHO 제거를 위해 흡착, 응축, 광촉매, 촉매산화, 플라즈마 기술, 생물학적 여과 등의 다양한 기술이 개발되어 왔다. 이중 촉매산화 기술은 효율이 높고 에너지 소비가 적어 효과적인 기술로 부각되고 있으며, 에너지 절약 측면과 독성 부산물 발생을 최소화 시킬 수 있는

† Corresponding Author: Kyonggi University
Department of Environmental Energy Engineering, Suwon-si 16227, Korea
Tel: S. C. Kim: +82-31-249-1476; S. S. Kim: +82-31-249-9741
e-mail: S. C. Kim: kmac40@kyonggi.ac.kr; S. S. Kim: sskim@kyonggi.ac.kr

기술이다[3]. 최근 HCHO를 상온에서 산화하는 촉매들이 보고되고 있으며, 지지체로서 TiO₂, MnO_x, CeO₂, FeO_x, ZrO₂, Al₂O₃ 등의 금속산화물을 사용하고 있다[4]. 특히, Kim 등[5]에 의하면 환원성 지지체인 TiO₂를 이용한 촉매를 사용하였을 때 환원 온도에 따른 활성 금속의 소결 및 산화 특성에 의해 HCHO 산화 효율이 증진되었다고 보고하였다. 또한, C. Zhang 등[6]은 다양한 귀금속의 HCHO 상온 산화능을 평가하였으며, Pt/TiO₂ > Rh/TiO₂ > Pd/TiO₂ > Au/TiO₂ >> TiO₂ 순서로 HCHO 산화 성능을 보고하였다. 또한, Kim 등[7]은 환원온도에 따라 HCHO 산화 능력이 증가됨을 보고하였으며, 이러한 결과는 활성금속인 Pt의 산화상태와 관련 있음을 규명하였다.

상기 귀금속을 사용하는 연구에서 해당 촉매 제조 시 성능의 극대화를 위해 고온에서의 열처리 공정을 필요로 하며, 활성금속의 산화상태를 적합한 형태로 조절하기 위한 환원 분위기 공정을 유지할 필요가 있다. 이러한 공정은 촉매 제조 공정에서 상당한 비용, 시간을 필요로 하며 환원 분위기 조성을 위해 수소와 같은 특정 폭발성 가스를 사용할 경우 폭발의 위험성도 배제할 수 없다. 따라서 이와 같은 촉매 제조 공정상 한계점을 극복하기 위하여 고온 열처리 공정을 동반하지 않는 새로운 촉매 제조 기술의 개발이 필요하다. H. Huang 등[8]은 환원제(NaBH₄)를 이용한 액상환원법으로 상온에서 환원시킨 Pd/TiO₂에 대한 활성을 보고하였으며, H₂ 분위기에서 환원시킨 촉매와 유사하거나 그 이상의 활성을 나타냄을 주장하였다. 그러나, Pt/TiO₂를 기반으로 하여 액상환원법을 적용시킨 촉매에 대한 물리·화학적 특성에 관한 연구는 미비한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 상용 TiO₂ 물리적 특성에 따른 영향 확인을 위하여 6종의 상용 TiO₂와 Pt를 이용한 액상환원 촉매의 활성을 평가하고자 하였다. 지지체의 물성 분석을 위해 BET, XRD, XPS 분석을 수행하였으며, HCHO 상온 산화반응의 메커니즘 확인을 위해 CO와 O₂를 이용한 *In situ* DRIFT 분석 및 H₂-TPR을 수행하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 촉매 제조 방법

본 연구에서는 사용된 촉매는 Pt/TiO₂계 촉매로서 PtCl₄ 전구체를 사용하였고, platinum을 액상 환원법을 기반으로 상용 TiO₂에 담지하여 제조하였다. 또한 본 연구에서 사용된 촉매의 활성금속은 지지체에 대한 무게비로 제조하였으며, 활성금속의 함량을 1 wt%로 고정하여 제조하였다. 계산된 활성금속의 양은 전구체를 제외한 순수 활성금속의 양이며, 증류수에 녹여 사용하였다. 액상에서 귀금속의 환원을 위한 대표적인 환원제인 N₂H₄를 사용하였다. 귀금속과 환원제외의 비율은 중량비는 1 : 10으로 하였다. 이와 같은 조건으로 제조된 촉매는 액상 환원 반응 후 수 회의 세척을 거치고 rotary vacuum evaporator를 이용하여 65 °C에서 감압 증류하였다. 제조된 촉매는 잔여 수분을 제거하기 위해 105 °C 오븐에서 24시간 이상 건조하였다.

2.2. 촉매 활성 평가

본 연구에서는 HCHO의 상온산화 성능 평가를 위한 실험 장치를 Figure 1와 같이 구성하였다. HCHO 안정적인 주입을 위해 paraformaldehyde의 증기압을 이용하였으며, 반응기에 주입되는 HCHO의 농도는 식 (1)에 의해 CO₂의 농도로 측정하였다[9]. 각 반응기를 통과한 가스는 비분산 적외선 가스분석기(ZKJ-2, Fuki Electric Co.)를 이용하여 완전산화된 CO₂의 농도를 측정 후, 전환율을 계산하였으며, 분석기로 유입되기 이전에 - 40 °C로 유지되는 칠러에 수분 트랩을

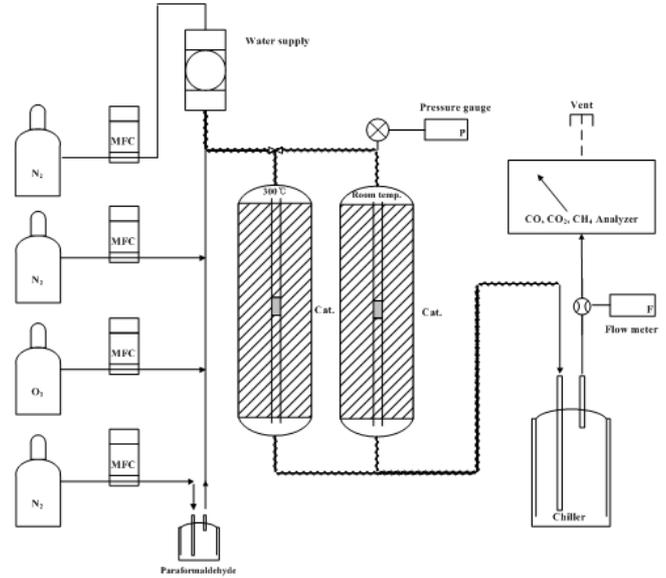


Figure 1. Schematic diagram and image of a fixed bed reactor.

Table 1. Experimental Condition in a Fixed Bed Reactor

Conditions		
Flow	500 cc/min	
Amount of catalyst	0.1 g	
Space velocity	600,000 cm ³ · g _{cat} ⁻¹ · h ⁻¹	
Temperature	Room temp.	
Humidity	> 50%	
Gas composition	N ₂	Balance
	O ₂	21%
	HCHO	29~31 ppm

설치하여 통과된 가스 내 수분을 모두 제거하였다. 해당 반응기에서 수분이 통과하는 모든 관은 수분의 응축을 방지하기 위해 히팅 밴드를 감아 사용하였다. Table 1에 HCHO 상온 산화 성능 평가 조건을 나타내었다.

상온 산화 반응기에 촉매를 충전하기 위해 직경 5 mm, 높이 600 mm quartz tube를 사용하였고, 반응기 내부 압력구배를 고려하여 제조한 촉매를 40~50 mesh로 체거름하였고, quartz wool을 이용하여 고정시켰다. HCHO의 산화 성능은 식 (2)를 통해 산출하였다.



$$HCHO \text{ conversion, \%} = \frac{[CO_{2,out}]}{[HCHO_{in}]} \times 100 \tag{2}$$

2.3. 분석 및 측정

본 연구에서는 촉매 제조에 사용된 지지체의 결정 구조와 기공구조 특성을 관찰하기 위하여 XRD (X-Ray diffraction, Rigaku Co., MiniFlex2), BET (Brunauer-Emmett-Teller, Micromeritics Co., ASAP 2010) 분석을 수행하였다. Crystallite size의 경우 XRD 분석 수치와 식 (3)을 이용하여 계산하였다. 또한, TiO₂ 종별 O/Ti 비율의 확인을

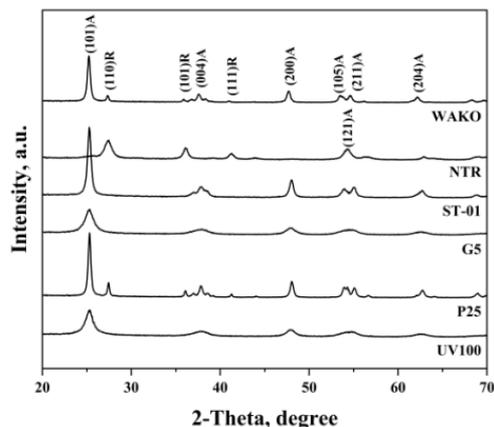


Figure 2. XRD analysis of various type of TiO₂.

위해 XPS (Thermo Fisher Scientific Co., K-alpha plus) 분석을 수행하였다. *In situ* FTIR (Fourier-transform infrared spectroscopy, Thermo Fisher Scientific Co., Nicolet iS10) 및 H₂-TPR (H₂-temperature programmed reduction, Micromeritics) 분석을 통해 촉매 표면 흡착종 및 흡착형태를 확인하였다.

$$D_{hkl} = \frac{K\lambda}{B_{hkl} \cos(\theta_{hkl})} \quad (3)$$

3. 결과 및 고찰

3.1. Pt/TiO₂ 촉매의 포름알데히드 산화 성능

Figure 2에 본 연구에서 사용된 6종의 상용 TiO₂에 대한 XRD 분석 결과를 나타내었다. 크기는 anatase, rutile 및 두 가지 상이 혼합된 형

Table 2. Physico-chemical Characteristics of Various TiO₂

Type	Particle size (μm)	Crystallite size (Å)	O/Ti mole ratio	BET
UV100	1.175	155.5	1.3197	288.717
P-25	3.61	246	1.8348	43.33
G-5	1.365	83.7	1.877	344.7245
NTR	2.535	122.7	1.4284	144.3179
ST-01	2.335	85.3	1.4225	276.0466
Wako	3.52	201	1.8857	9.6055

태로 나타나며, Wako와 P-25 경우 anatase와 rutile 상이 혼합된 형태이다. Table 2에는 분석에 의한 6종 TiO₂의 particle size, crystallite size, BET 및 O/Ti mole ratio를 나타내었으며, particle size는 1.175~3.61 μm, crystallite size는 85.3~246, O/Ti 1.3197~1.8857, 비표면적은 약 10~340 m²/g으로 다양한 값을 나타내었다. 상관성의 가시화를 위해 물리적 특성에 따른 활성을 Figure 3에 나타내었다. 물리적 특성과 활성의 상관성은 미미하였으며, 활성의 차이는 다른 인자가 있을 것으로 사료된다.

6종의 TiO₂를 각각 사용하여 제조한 촉매에 대하여 HCHO 상온 산화 성능을 평가한 후, 사용된 모든 TiO₂에 대하여 비교한 결과를 Figure 4에 나타내었다. TiO₂ 종류에 따라 동일 조건에서 나타나는 활성이 서로 상이하였으며, 가장 높은 전환율을 나타내는 촉매는 P-25를 지지체로 사용한 것으로서 약 75%의 HCHO 산화 활성이 관찰되었다. 또한, ST-01를 지지체로 제조된 촉매의 경우 60%의 산화 성능을 확인할 수 있었다. 한편, Wako를 지지체로 제조된 촉매의 경우 43%의 HCHO 산화 성능을 확인하였다. Kim 등[10]은 기상환원 Pt/TiO₂에 대하여 TiO₂ 중에 따른 전환율을 보고하였으며, TiO₂ 종류

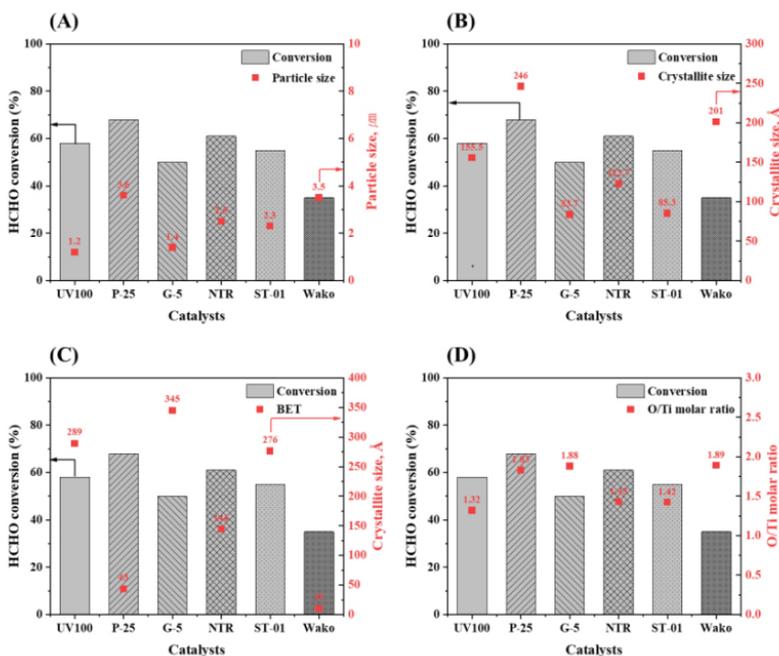


Figure 3. Conversion and physico-chemical properties (A: particle size, B: crystallite size, C: specific surface area, D: O/Ti molar ratio) of Pt/TiO₂ prepared with various TiO₂ support.

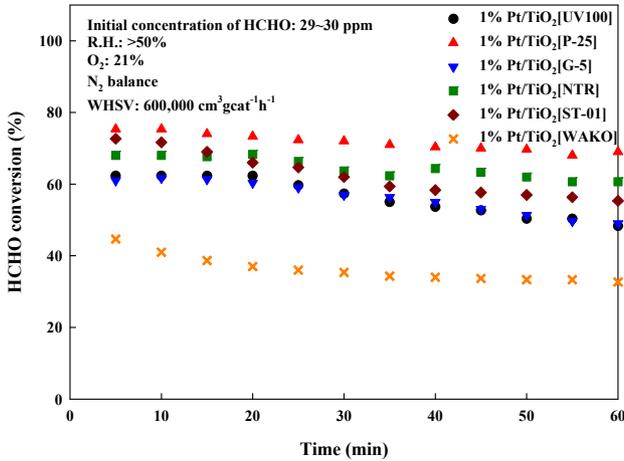


Figure 4. Effect of TiO₂ type on oxidation performance of HCHO at room temperature, Conditions: HCHO concentration: 29~31 ppm, O₂ concentration: 21%, R. H.: > 50%, S.V.: 600,000 cm³ · gcat⁻¹ · h⁻¹.

에 따라 ST-01 > NTR > UV100 > G-5 > P-25 > Wako의 전환율을 나타낸다고 보고하고 있다. 본 연구에서 제조한 액상환원 촉매의 경우 P-25 > NTR > ST-01 > UV100 = G-5 > Wako의 순서로 전환율을 보이며 다른 결과를 나타내었다. 이는 제법에 따라 촉매 물성이 변할 수 있음을 시사한다. 500 °C 이상의 환원 분위기에서 열처리를 통해 제조된 촉매는 SMSI (strong metal support interaction) 효과에 의해 활성금속의 표면 전자밀도 증가를 야기한다. SMSI 효과는 고온 열처리 시 TiO₂와 같은 환원성 지지체와 활성금속 사이의 강한 상호작용이 형성되어 지지체의 풍부한 전자가 활성금속으로 이전되는 현상이며, 지지체의 primary particle size에 의존하는 것으로 알려져 있다[10, 11]. 본 연구에서 시도한 액상환원법은 촉매제조시 열에 노출되지 않는 특성이 있다. 따라서 지지체의 crystallite size와는 상관성이 없는 것으로 보인다.

3.2. Pt/TiO₂ 촉매의 흡착 특성

C. Zhang 등[12]은 Na를 첨가한 Pt/TiO₂ 촉매의 새로운 반응 경로에 대한 연구를 진행하였으며, HCHO의 완전산화 중간체인 CO의 촉매 표면 흡착이 수분과 만나 CO₂로 완전 산화시키는 작용을 한다고 보고하였다. 또한, Kim 등[10]은 Pt⁰ 종에 비하여 PtO 종의 흡착 세기가 강하여 탈착이 용이하지 않으며, 이러한 현상에 의해 흡·탈착의 속도가 중요한 촉매반응에 부정적인 영향을 미쳐 PtO 종의 경우 촉매 활성점으로 부적합하다고 주장하고 있다. 이처럼 활성금속의 산화상태에 따른 흡착세기는 HCHO 산화 반응에서 중요한 인자이며, 이를 규명하고자 Pt와 1:1로 흡착되는 CO를 이용한 *In situ* DRIFT 분석과 H₂-TPR을 수행하였다. 촉매는 우수한 활성 및 내구성을 갖는 P-25를 이용한 Pt/TiO₂[P-25], 그리고 현저히 낮은 활성을 나타낸 Wako를 이용한 Pt/TiO₂[Wako]를 선정하였다. 그 결과 Figure 5에서 나타난 바와 같이, 두 촉매 모두 Pt에 흡착된 CO peak이 관찰되었다. 2064 cm⁻¹ 부근에서 관찰되는 peak는 Pt⁰ 종에 흡착된 CO를 의미하며, 2070~2100 cm⁻¹와 2100~2130 cm⁻¹에서 관찰되는 peak는 PtO 종에 흡착된 CO를 의미한다[13]. 우수한 활성을 보이는 Pt/TiO₂[P-25] 촉매의 경우 CO가 Pt⁰ 종과 PtO 종에 흡착되었지만, 비교적 활성이 낮은 Pt/TiO₂[Wako] 촉매의 경우 CO가 PtO 종에만 흡착되었다. 또한, O₂를 흘려주며 흡착된 CO의 상온 탈착 시험을 수행한 결과 Figure 6에서 확인한 바와 같이

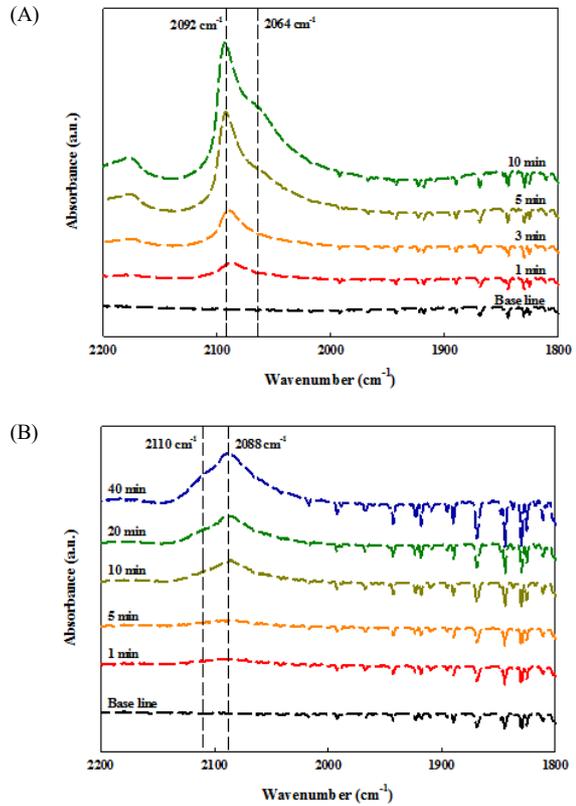


Figure 5. FT-IR spectra of CO adsorption reaction on Pt based catalyst (A) 1% Pt/TiO₂[P-25], (B) 1% Pt/TiO₂[Wako].

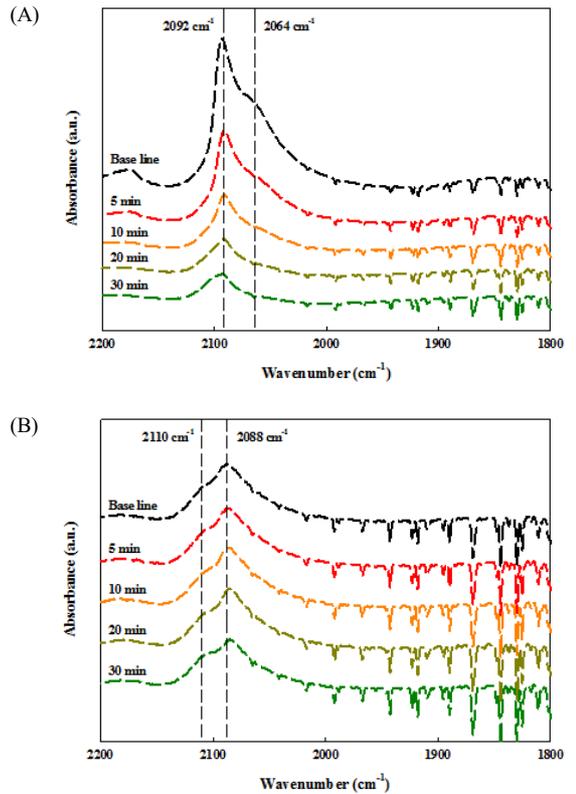


Figure 6. FT-IR spectra of CO desorption reaction on Pt based catalyst, (A) 1% Pt/TiO₂[P-25], (B) 1% Pt/TiO₂[Wako].

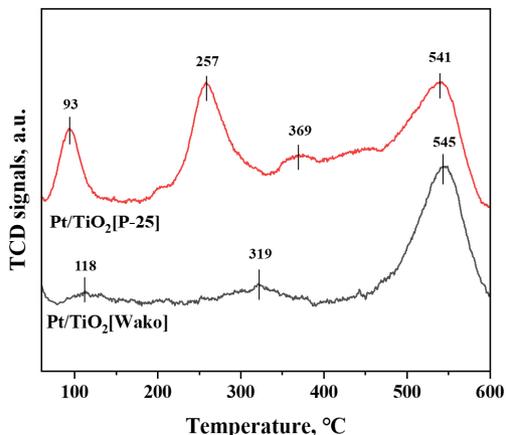


Figure 7. H₂-TPR profiles of 1%Pt/TiO₂[P-25] and 1%Pt/TiO₂[Wako] catalysts.

Pt⁰ 중에 흡착된 CO는 비교적 쉽게 탈착이 진행되었으나, PtO 중에 흡착된 CO는 상온에서 거의 탈착이 진행되지 않음을 확인할 수 있다. 본 연구에서 제조한 액상환원 기반 촉매의 경우 PtO 종의 강한 흡착 세기뿐만 아니라 Pt⁰ 종에서의 흡착세기 증가 역시 활성 저하에 영향을 미친 것으로 보인다. 또한, 2064 cm⁻¹ 부근에서 흡착을 발생시킨 Pt⁰ 종의 흡·탈착이 용이하였고, 2070~2100 cm⁻¹에서 흡착을 발생시킨 PtO 종과 2100~2130 cm⁻¹에서 흡착을 발생시킨 PtO 종의 경우 흡·탈착이 상대적으로 용이하지 않은 것으로 나타났다.

Figure 7에는 2종 촉매에 대한 H₂-TPR 분석 결과를 나타내었다. Pt/TiO₂[P-25]의 경우 93 °C, 257 °C, 369 °C, 541 °C에서 peak가 관찰되었다. 93 °C에서 관찰되는 peak의 경우 PtO 종을 의미하며, 257 °C와 369 °C에서 관찰되는 peak는 Pt-O_v-Ti³⁺ 종을 의미하고, 541 °C에서 관찰되는 peak는 TiO₂가 환원되며 형성된다[14]. Pt/TiO₂[Wako]의 경우에도 118 °C, 319 °C, 545 °C에서 peak가 관찰되었으며, 마찬가지로 각각 PtO, Pt-O_v-Ti³⁺, TiO₂ 종을 의미한다. PtO, Pt-O_v-Ti³⁺ 종의 경우 1%Pt/TiO₂[P-25] 촉매에서 상대적으로 크게 관찰 되었고 온도범위는 낮게 나타났다. 이는 활성점으로 작용할 수 있는 Pt 종이 많고, 또 산화환원에 필요한 에너지가 더 작음을 의미한다. FT-IR, H₂-TPR 결과를 모두 고려하면, 환원된 Pt 종이 표면에 많이 존재할수록 촉매의 성능이 우수하다. 이러한 결과는 Kim 등[14]이 보고한 내용과 잘 일치한다. 즉, 액상환원법으로 제조된 촉매나 기상환원으로 제조된 촉매 모두 환원된 Pt 종이 촉매 표면을 우점할수록 성능이 우수한 것을 시사한다.

4. 결 론

본 연구에서는 실내오염물질 중 HCHO를 제거하기 위해, 6종의 TiO₂에 Pt를 담지시켜 제조된 액상환원 Pt/TiO₂ 촉매의 산화 반응 비교 연구를 수행하였다. 또한 제조된 촉매 및 지지체에 대하여 XRD, BET, FT-IR, H₂-TPR 분석을 진행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

상용 TiO₂ 종류에 따른 HCHO 상온 산화 활성 실험을 진행한 결과, P-25 > NTR > ST-01 > UV-100 = G-5 > Wako 순의 산화 능력을 확인하였다. P-25를 이용하여 제조된 촉매의 경우 75%의 HCHO 산화 성능을 나타내었고, Wako를 이용하여 제조된 촉매의 경우 43%의 HCHO 산화 성능을 확인할 수 있었다. 입자사이즈, 결정화도 및 O/Ti

mole ratio 및 비표면적은 TiO₂의 종류에 따라 상이하게 나타났다. P-25와 Wako의 경우 비표면적을 제외한 물성이 비슷한 수치로 관찰 되었으나, 활성에서 큰 차이를 확인할 수 있었다. 이러한 결과를 종합 하여, 물성과 산화 성능사이의 상관성은 미미하며, 산화 성능에 관여 하는 다른 인자가 있을 것으로 판단된다.

In situ DRIFT와 H₂-TPR 분석을 통해 촉매 표면의 활성 특성을 확인한 결과 표면에 존재하는 Pt종이 산화 활성에 주요인자임을 확인할 수 있었으며, Pt 종 중에서도 In situ DRIFT 분석에서 흡착세기에 따라 Pt-CO 흡착 스펙트럼이 변화함을 확인하였다. 구체적으로는 2070~2100 cm⁻¹에서 관찰되는 PtO 종과 2100~2130 cm⁻¹에서 관찰되는 PtO 종보다는 2064 cm⁻¹ 부근에서 관찰되는 Pt⁰ 종이 흡·탈착이 용이하고, 중요한 활성점으로 작용하는 것으로 판단된다.

감 사

본 연구는 한국환경산업기술원의 대기 환경산업 경쟁력 강화 국산화 기술 개발사업을 지원받아 수행된 연구로 이에 감사드립니다(No. RS-2023-00220022).

References

1. B. C. Ko, J. K. Lee, Y. S. Lee, M. G. Lee, and S. K. Kim, A study on odor emission characteristics of domestic sewage treatment facilities using composite odor concentration and hydrogen sulfide concentration, *J. Environ. Sci.*, **21**, 1379-1388 (2012).
2. C. M. Thompson, R. P. Subramaniam, and R. C. Grastrom, Mechanistic and dose considerations for supporting adverse pulmonary physiology in response to formaldehyde, *Toxicol. Appl. Pharmacol.*, **233**, 355-359 (2008).
3. H. S. Kim, J. H. Kim, J. H. Ryu, K. J. Jung, S. C. Oh, B. E. Hong, S. H. Kang, N. K. Park, and K. J. Woo, Recent trends for the removal and the application technology of vocs in process Gas, *J. Energy Clim. Chang.*, **12**, 165-177 (2017).
4. X. Du, C. Li, L. Zhao, J. Zhang, L. Gao, J. Sheng, Y. Yi, J. Chen, and G. Zeng, Promotional removal of HCHO from simulated flue gas over Mn-Fe oxides modified activated coke, *Appl. Catal. B*, **232**, 37-48 (2018).
5. G. J. Kim, P. W. Seo, Y. S. Kang, and S. C. Hong, A study on the reaction characteristics of the HCHO oxidation using noble metal catalysts at room temperature, *Appl. Chem. Eng.*, **25**, 300-306 (2014).
6. C. Zhang and H. He, A comparative of TiO₂ supported noble metal catalysts for the oxidation of formaldehyde at room temperature, *Catal. Today*, **126**, 345-350 (2007).
7. S. S. Kim, K. H. Park, and S. C. Hong, A study on HCHO oxidation characteristics at room temperature using a Pt/TiO₂, *Appl. Catal. A Gen.*, **398**, 96-103 (2011).
8. H. Huang and D. Y. C. Leung, Complete oxidation of formaldehyde at room temperature using TiO₂ supported metallic Pd nanoparticles, *ACS Catal.*, **1**, 348-354 (2011).
9. I. H. Hwang, *A study on HCHO Oxidation Characteristics at Room Temperature Using a Pt/TiO₂ Catalyst Prepared by Liquid Reduction Method*, MS Dissertation, Kyonggi Universtiy, Suwon, Korea (2019).
10. G. J. Kim, S. M. Lee, S. C. Hong, and S. S. Kim, Active oxygen

- species adsorbed on the catalyst surface and its effect on formaldehyde oxidation over Pt/TiO₂ catalysts at room temperature; Role of the Pt valence state on this reaction?, *RSC Adv.*, **8**, 3626-2636 (2018).
11. R. Perez-Hernandez, F. Aguilar, A. Gomez-Cortes, and G. Diaz, NO Reduction with CH₄ or CO on Pt/ZrO₂-CeO₂ Catalysts, *Catal. Today*, **107-108**, 175-180 (2005).
 12. C. Zhang, F. Liu, Y. Zhai, H. Ariga, N. Yi, Y. Liu, K. Asakura, M. F-Stephanopoulos, and H. He, Alkali-metal-promoted Pt/TiO₂ opens a more efficient pathway to formaldehyde oxidation at ambient temperatures, *Angew. Chem. Int.*, **51**, 9628-9632 (2012).
 13. E. Ivanova, M. Mihaylov, F. Thibault-Starzyk, M. Daturi, and K. Hadgivanov, FTIR Spectroscopy Study of CO and NO Adsorption and CO-Adsorption on Pt/TiO₂, *Mol. Catal. A: Chem.*, **274**, 179-184 (2007).
 14. S. S. Kim, H. H. Lee, and S. C. Hong, The effect of the morphological characteristics of TiO₂ support on the reverse water-gas shift reaction over Pt/TiO₂ catalysts, *Appl. Catal. B Environ.*,

119-120, 100-108 (2012).

Authors

Jae Heon Kim; M.Sc., Student, Department of Environmental Energy Engineering, Graduate School of Kyonggi University, Suwon-si 16227, Korea; jheonkim@kyonggi.ac.kr

Younghee Jang; Ph.D Candidate, Student, Department of Environmental Energy Engineering, Graduate School of Kyonggi University, Suwon-si 16227, Korea; yhjjang39@kyonggi.ac.kr

Geo Jong Kim; Ph.D., Postdoc, Korea Research Institute of Chemical Technology, Daejeon-Si 34114, Korea; kujong@kRICT.re.kr

Sung Chul Kim; Ph.D., Assistant professor, Department of Environmental Energy Engineering, Kyonggi University, Suwon-si 16227, Korea; kmac40@kyonggi.ac.kr

Sung Su Kim; Ph.D., Associate professor, Department of Environmental Energy Engineering, Kyonggi University, Suwon-si 16227, Korea; sskim@kyonggi.ac.kr