

La₂O₃가 첨가된 Pd/TiO₂ 촉매의 개발 및 H₂ 상온산화 반응에서의 성능 향상 연구

이동윤 · 김성철* · 이상문* · 김성수*[†]

경기대학교 일반대학원 환경에너지공학과, *경기대학교 환경에너지공학과
(2020년 10월 19일 접수, 2020년 11월 17일 수정, 2020년 11월 18일 채택)

Development of Pd/TiO₂ Catalysts with La₂O₃ Addition and Study on the Performance Improvement of H₂ Oxidation at Room Temperature

Dong Yoon Lee, Sung Chul Kim*, Sang Moon Lee* and Sung Su Kim*[†]

Department of Environmental Energy Engineering, Graduate School of Kyonggi University, Suwon 16227, Korea

*Department of Environmental Energy Engineering, Kyonggi University, Suwon 16227, Korea

(Received October 19, 2020; Revised November 17, 2020; Accepted November 18, 2020)

초 록

본 연구에서는 상온 조건에서 추가적인 에너지원 없이 H₂ 산화가 가능한 Pd/TiO₂ 촉매를 제조하였고, 지지체인 TiO₂의 비표면적은 Pd/TiO₂ 촉매의 H₂ 산화 반응 성능과 비례하지는 않은 것을 확인하였다. 또한 촉매의 물성 변화에 의한 성능 영향 평가를 위하여 La₂O₃를 Pd/TiO₂ 촉매에 첨가하였다. La₂O₃를 TiO₂에 함량별로 첨가하여 Pd/La₂O₃-TiO₂를 제조하였고, CO chemisorption 분석을 진행하였다. Pd/TiO₂(G) 촉매의 전환율(14% at 0.5% H₂)과 비교하여 Pd/La₂O₃-TiO₂ 촉매가 74% 전환율로 5배 이상의 성능 증진이 나타났다. Pd/La₂O₃-TiO₂ 촉매는 활성금속인 Pd의 metal dispersion이 클수록 H₂ 산화반응에 유리한 것으로 분석되었다. 하지만 첨가되는 La₂O₃가 10%를 초과하게 되면 촉매 성능이 다시 감소하는 것을 알 수 있었다. 마지막으로 Pd/La₂O₃-TiO₂ 촉매의 물성이 지배적인 영향을 미치는 것은 주입되는 H₂가 0.3~0.5% 농도 조건까지이며, 1% 이상의 H₂ 농도부터는 물질전달이 촉매 반응속도를 지배하는 것으로 판단된다.

Abstract

In this study, a Pd/TiO₂ catalyst which oxidized H₂ at room temperature without an additional energy source was prepared. And a specific surface area of TiO₂ as a support was not proportional to H₂ oxidation reaction performance of Pd/TiO₂ catalyst. In addition La₂O₃ was added to Pd/TiO₂ catalyst in order to evaluate the performance effect due to the change of catalysts physical properties. A Pd/La₂O₃-TiO₂ was prepared by adding different amounts of La₂O₃ to TiO₂ and CO chemisorption analysis was performed. Compared to the conversion rate (14% at 0.5% H₂) of the Pd/TiO₂(G) catalyst, the Pd/La₂O₃-TiO₂ catalyst showed 74% which was improved by more than five times. It was found that the larger the metal dispersion of Pd as an active metal is, the more favorable to H₂ oxidation reaction is. However, when the added La₂O₃ amount exceeded 10%, the catalyst performance decreased again. Finally, it was concluded that the physical properties of the Pd/La₂O₃-TiO₂ catalyst have a dominant influence on the catalytic activity until 0.3~0.5% of injected H₂ concentrations and the catalyst reaction rate was controlled by substance transfer from 1% or more concentrations of H₂.

Keywords: Pd, TiO₂, La₂O₃, H₂ oxidation, Physical property

1. 서 론

2015년 12월에 채택된 파리협정에 따라 2021년부터 총 197개국에서는 온실가스 배출 감축을 위한 자발적인 감축 목표를 설정하고, 선진국과 개도국간의 구분 없이 모두가 참여하는 포괄적 체제를 구축하도록 협의하였다. 이에 따라 온실가스 감축 대책에 대한 관심이 더욱

증가하고 있으며, 관련 연구들이 활발히 진행될 것으로 기대된다. 특히 운송 분야에서는 디젤 연료와 같은 화석에너지에 의존해왔으나, 최근 수소(H₂) 에너지를 에너지원으로 활용하려는 시도가 있음에 따라 대기오염 배출량 감소가 기대된다. 그 예로 H₂ 연료전지를 적용한 차량, 열차 및 선박 등 다양한 제품들이 개발 또는 상용화되고 있다[1].

하지만 H₂ 에너지를 사용함에 있어서 H₂ 생산과 적용만큼이나 안전성(safety)을 확보하는 것이 중요하다. 국내외적으로 H₂ 충전소가 폭발하는 사고들이 다수 보도됨에 따라 H₂ 에너지에 대한 국민들의 불안감이 클 것으로 예상된다. 따라서 H₂를 안전하게 보관하는 것뿐만 아니라 예기치 못한 사고가 발생했을 때를 대비할 수 있는 H₂ 폭발 방지 기술 개발이 필요하다. 이와 관련하여 원자력발전소에서는 이미 PAR

[†] Corresponding Author: Kyonggi University,
Department of Environmental Energy Engineering, Suwon 16227, Korea
Tel: +82-31-257-7689 e-mail: sskim@kyonggi.ac.kr

Table 1. BET and Chemical Composition of Various TiO₂ by IC/ICP

TiO ₂	*Weight, %									BET, m ² /g	Ref.
	SO ₄	SO ₃	NH ₃	Na ₂ O	WO ₃	MoO ₃	La ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅		
G		0.4	0.07						0.05	344.72	[17]
D1		1.2							0.06	76.65	[18]
D2		2.1				10			0.01	84.31	[19]
D3		0.7					9.9		0.06	96.05	[19]

* Result of IC/ICP.

(passive autocatalytic recombiner)이라고 하는 H₂ 폭발방지 기술이 적용되고 있다. PAR의 장점은 전기 없이 자동적으로 기상의 H₂와 O₂를 결합시켜 물로 전환시키는 것이다[2,3].

PAR 촉매는 alumina, stainless steel plates, silica, polyester 및 honeycomb 등의 지지체에 Pd 또는 Pt 등의 귀금속을 담지한 귀금속 촉매가 사용된다[2,3]. PAR에서는 촉매의 성능이 안정성을 결정하는 중요한 요소로 작용한다. 이에 따라 우수한 성능의 귀금속 촉매를 제조하기 위해서 환원처리가 필수적이다[4,5]. 환원처리는 고온 조건에서 H₂ gas와 같은 환원제로 촉매를 열처리하는 것을 지칭한다[6-8]. 촉매의 활성금속은 환원제에 의해 지지체 표면에 넓게 분포하게 된다[9]. 다수의 귀금속 촉매 연구들에서는 Pd 또는 Pt 귀금속들의 particle size와 metal dispersion이 촉매의 성능에 영향을 미치는 것으로 보고하였다 [5,10,11]. 특히 그 중에서도 Pd은 HCHO, CO 등을 산화시키는 촉매의 활성금속으로 널리 사용되고 있다[9-11]. 또한 환원성 지지체인 TiO₂, CeO₂ 및 SiO₂ 등에 Pd와 같은 귀금속들을 담지하여 환원 열처리를 하게 되면, SMSI (strong metal-support interactions) effect에 의하여 촉매의 화학흡착 성질이 크게 달라지는 것으로 알려져 있다[7-11]. 또한 Singh 등[12]에 따르면 환원성 지지체는 열적 내구성이 비환원성 지지체보다 낮은 반면, 높은 산소 저장 능력(oxygen storage capacity, OSC)을 갖고 있다고 보고하였다. 따라서 상온에서 구동되는 H₂ 산화촉매에 있어서 환원성 지지체의 산소 흡착, 전달 및 저장 능력이 중요한 역할을 수행할 것으로 사료된다. 따라서 본 연구에서는 Pd을 TiO₂에 담지하고 환원 열처리를 통해 촉매를 활성화시키고자 하였다.

환원성 지지체 중 TiO₂는 그 제조방법이 다양하여, 제조사 및 제품 모델에 따라 서로 다른 물성을 가질 수 있다. Choi 등[13]과 Kim 등[14]은 다양한 제조사로부터 TiO₂를 구매하여, Mn/TiO₂ 촉매를 이용한 SCR 반응과 Pt/TiO₂의 상온 HCHO 촉매산화에 대한 연구를 보고하였다. 하지만 TiO₂에 포함되어 있는 불순물에 의한 촉매의 상온 H₂ 산화 성능 영향에 대한 연구는 미미한 실정이다.

상용 TiO₂에는 W, La, Si 등과 같은 불순물이 포함되어 있는데, 그 중에서 La₂O₃는 촉매 지지체 및 조촉매로서 활용되는 연구들이 보고되었다[6-8,15]. La₂O₃는 1980년대에 Fleish 등[7]과 Hicks 등[8]의 연구에서 환원성을 갖는 물질로 보고되었다. 이는 앞서 설명한 SMSI effect를 증대시키는 요소로 작용할 수 있음을 의미한다. Yang 등[15] 역시 Pd이 존재하는 350 °C 조건에서 La₂O₃이 환원될 수 있다고 보고하였다. 또한 Ahn 등[6]은 Pd-La/SiO₂ 촉매에 대한 TPR (temperature programmed reduction) 및 H₂ chemisorption 분석을 통해 PdO가 La₂O₃에 의해 환원되는 연구 결과를 보고하였다. 따라서 TiO₂ 지지체에 La₂O₃를 첨가함으로써, 촉매 성능에 영향을 미칠 것으로 예상된다.

따라서 본 연구에서는 Pd 활성금속을 TiO₂ 지지체에 담지한 Pd/TiO₂ 촉매를 기반으로 외부 열원 없이 H₂를 산화시키는 상온산화 촉매반응을 확인하였고, 이때 사용된 TiO₂에 포함된 불순물 중에서 La₂O₃에 의

한 H₂ 상온산화 반응에서의 성능 향상 연구를 수행하였다. La₂O₃ 첨가에 의한 촉매 성능 영향을 확인하기 위하여, Pd/La₂O₃-TiO₂ 촉매를 La₂O₃ 함량별로 제조하였다. 또한 Pd/La₂O₃-TiO₂ 촉매의 물성 변화를 확인하고자 CO chemisorption 분석을 진행하였다.

2. 실험

2.1. H₂ 상온산화 촉매 제조 방법

본 연구에서는 활성금속 Pd의 전구체 물질로 palladium(II) chloride (Alfar Aesar Co.)을 사용하고, Millennium Co.의 G-5 TiO₂, DT series TiO₂와 La₂O₃ (Sigma Aldrich Co.)을 사용하였다. 촉매 제조 전 TiO₂의 불순물 성분은 Table 1과 같다. 또한 본 연구의 Pd/TiO₂와 Pd/La₂O₃-TiO₂ 촉매는 습윤 함침법(wet impregnation method)로 제조되었다.

지지체 대비 1% 함량이 되도록 활성금속 Pd의 전구체를 80 °C 조건의 증류수에 용해시키고 서서히 온도를 낮추었다. 활성금속 용액이 완성되면 TiO₂ 및 La₂O₃를 각 촉매 조건에 맞게 넣고 일정 속도로 교반하여 혼합하였다. 이때 각 촉매 조건이란 TiO₂ 종류 또는 TiO₂에 첨가되는 La₂O₃ 함량을 말한다. 슬러리(slurry) 상태의 혼합용액을 1 hr 이상 교반한 후 회전진공증발기(rotary vacuum evaporator)를 이용하여 65 °C에서 수분을 증발시켜 파우더 형태의 촉매를 얻었다. 최종적으로 충분히 건조된 촉매를 전기식 소성로에서 Air와 H₂ 분위기로 각각 열처리하였다. 제조에 사용된 TiO₂ 종류(G, D1, D2, D3)에 따라 Pd/TiO₂ (G, D1, D2, D3)로 명명하고 Pd/La₂O₃-TiO₂ 촉매는 첨가된 La₂O₃의 함량(1, 5, 10%)에 따라 Pd/La₂O₃-TiO₂ (L1, L5, L10)로 명명하였다. 실험 전 파우더 형태의 촉매들을 충분히 건조시키고 압축, 분쇄하여 40~50 mesh 크기로 체질하여 적합한 입자를 얻은 후 실험을 수행하였다.

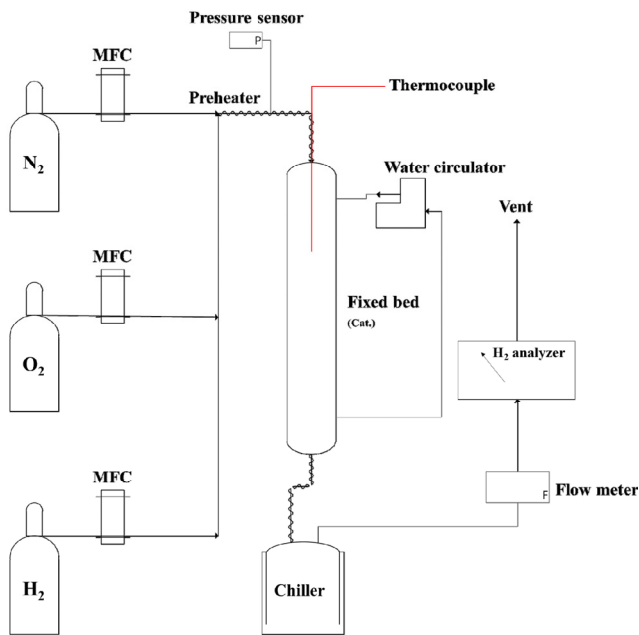
2.2. 실험장치

본 연구의 촉매 상온산화 반응시험은 연속흐름식 고정층 반응기(Figure 1)를 이용하였다. 공급되는 가스는 H₂, O₂, N₂이며, MFC (mass flow controller)를 사용하여 조건에 맞는 유량으로 일정하게 주입하였다. 또한 가스 공급관은 전체에 걸쳐 스테인레스 및 테프론 관으로 하였으며, 가스 라인에 수분의 응축을 방지하기 위하여 가열 밴드(heating band)를 설치하여 180 °C로 일정하게 유지하였다. 촉매를 충전하는 석영관은 내경 8 mm, 높이 600 mm으로 제작하였으며, 촉매층을 고정하기 위해 석영관(quartz wool)을 사용하였다. 또한, 반응기의 온도는 항상 일정하게 25 °C로 유지하기 위하여 외부에 특수제작된 항온수조를 이용하여 물 순환 장치(water circulator)로 25 °C의 물을 순환 시킴으로써 온도를 일정하게 유지하였으며, 온도 측정은 K-type의 열전대 측정기(thermocouple)를 사용하였다.

촉매 상온산화 반응실험은 일정 농도의 H₂와 21% O₂, N₂ balacne

Table 2. Experimental Condition for H₂ Oxidation

Characteristic index		Value
Particle size		40~50 mesh (300~425 μm)
Temperature		25 °C
Inlet gas concentration	H ₂	0.5~4%, 0.3~4%
	O ₂ Purity, 99.9%	21%
Inlet gas concentration	N ₂ Purity, 99.9%	Balance
	Space velocity	60,000 hr ⁻¹
Total flow		1,000 cc/min

Figure 1. Schematic diagram of a fixed bed H₂ oxidation reaction system.

가스와 함께 주입한다. 실험 조건은 Table 2와 같으며, 주입되는 H₂와 O₂는 식 (1)과 같은 반응으로 진행된다.

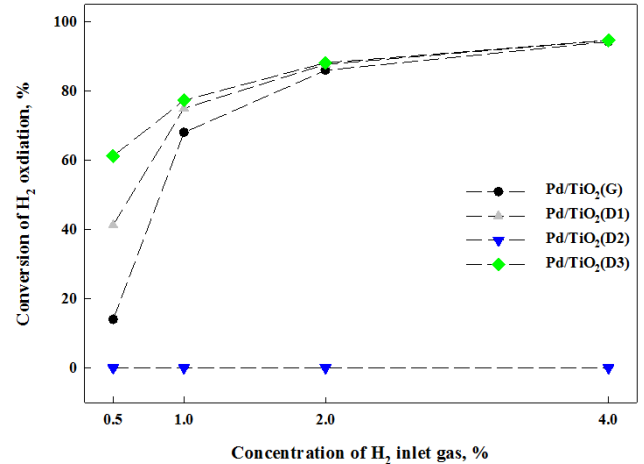


H₂의 산화반응이 완료된 후 촉매 층 후단으로 배출된 가스는 칠러(chiller)를 거쳐 수분을 완전히 제거한 후 H₂ 분석용 열전도율 가스 분석기(thermal conductivity gas analyzer)로 공급되도록 하였다. H₂ analyzer는 Fuji Electric사의 ZAF3K404-LMCAY-YEAYY 모델을 사용하였다. 각 촉매의 반응활성은 H₂의 전환율로 나타내었으며 다음과 같이 정의하였다.

$$\text{H}_2 \text{ conversion (\%)} = \frac{C_{\text{inlet H}_2} - C_{\text{outlet H}_2}}{C_{\text{inlet H}_2}} \times 100 \quad (2)$$

2.3. CO chemisorption 분석

La₂O₃를 비유별로 제조한 Pd/La₂O₃-TiO₂ 촉매의 Pd dispersion 및 crystallite size를 분석하기 위하여 2920 Autochem (Micromeritics) 분

Figure 2. The H₂ conversion of each Pd/TiO₂ catalysts with respect to H₂ concentration.

석기를 사용하였다. 파우더 형태의 촉매를 30 mg U형의 반응기에 충전한 후 10 vol% H₂/Ar를 50 cc/min의 유량으로 주입하며 30 °C에서 300 °C까지 10 °C/min의 속도로 승온 시킨 후 90 min 유지하며 불순물(수분 포함)을 제거하였다. 이후 He를 주입하며 300 °C에서 30 min 표면에 흡착된 H₂를 제거하였다. 다음으로는 촉매의 온도를 40 °C로 하온한 후 10 vol% CO/He를 50 cc/min 유량으로 pulse 주입하며 촉매에 흡착된 CO의 양을 역으로 계산하여 Pd의 분산도를 측정하였다. 이때 Pd는 CO와 1 : 1 흡착을 기본으로 가정하여 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

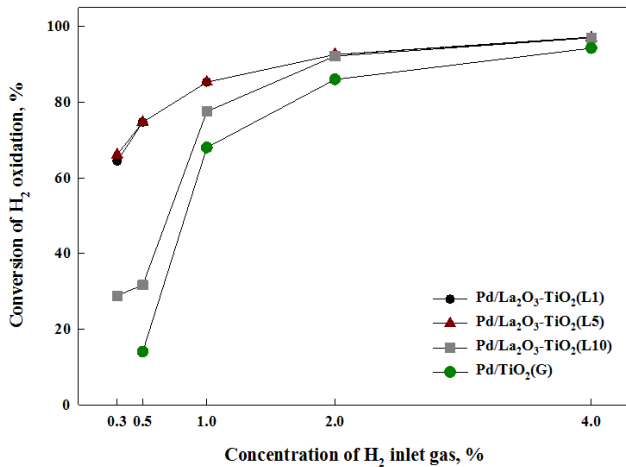
3.1. TiO₂ 종류에 따른 Pd/TiO₂ 촉매의 H₂ 상온산화 반응 성능

본 연구에서는 총 4종류의 TiO₂를 사용하여 Pd/TiO₂를 제조하였다. 각 TiO₂는 비표면적이 서로 상이하며 SO₃, NH₃, MoO₃, La₂O₃ 등의 성분들이 첨가 또는 제조과정에서 포함되어 있는 것을 확인할 수 있다. 이러한 Pd/TiO₂ (G, D1, D2, D3) 촉매들에 대한 H₂ 산화반응 성능을 확인한 결과, Figure 2와 같다. Pd/TiO₂ (D2) 촉매는 H₂ 산화반응이 거의 진행되지 않은 것으로 나타났고, Pd/TiO₂ (G)와 Pd/TiO₂ (D1), Pd/TiO₂ (D3) 촉매에서는 0.5% H₂ 농도에서부터 H₂가 산화되어 물로 전환되는 것을 확인하였다. 또한 촉매에 주입되는 H₂ 농도가 증가함에 따라 반응에 참여하는 H₂의 mole수가 많아지게 되면서, H₂ 산화촉매의 성능이 증진되었다.

H₂ 농도 조건에 따라 0.5~1%에서는 TiO₂ 종류에 따른 촉매 성능 차이가 확인되었으나, 2% 이상에서는 Pd/TiO₂ (D2)를 제외하고 모든 촉매들이 유사한 H₂ 전환율을 나타내었다. 결과적으로 Pd를 담지하기 전 TiO₂ (G)가 가장 넓은 비표면적을 갖고 있으나 Pd/TiO₂ (G) 촉매의 성능이 가장 낮은 것으로 확인되었다. 비표면적이 각기 다른 TiO₂는 촉매 성능 차이가 존재한다는 연구보고들이 있었다. 그 중 대표적인 연구결과를 분석해보면, Kim 등[17]은 서로 다른 비표면적을 가진 여러 상용 TiO₂로 제조된 Pt/TiO₂ 촉매가 RWGS 반응에서 촉매의 비표면적과 성능이 비례한다고 보고하였다. 또한 TiO₂의 비표면적은 활성금속 담지 후 촉매의 비표면적에도 영향을 미치는 것으로 설명하였으며, 촉매의 제조 과정에서 열처리 및 활성금속 담지에 의해 촉매의 비표면적이 감소한다고 설명하였다[17]. 하지만 본 연구에서는 TiO₂ (G)가 TiO₂ (D1)와 TiO₂ (D3)보다 비표면적이 클에도 불구하고, Pd 담지 후

Table 3. Metal Dispersion and Crystallite Size of Pd/La₂O₃-TiO₂ Catalysts

Catalyst	Metal dispersion, %	Crystallite size, nm
L1	42.3018	2.2073
L5	34.3328	2.7196
L10	26.0655	3.5822

**Figure 3.** The H₂ conversion of each Pd/La₂O₃-TiO₂ catalysts with respect to H₂ concentration.

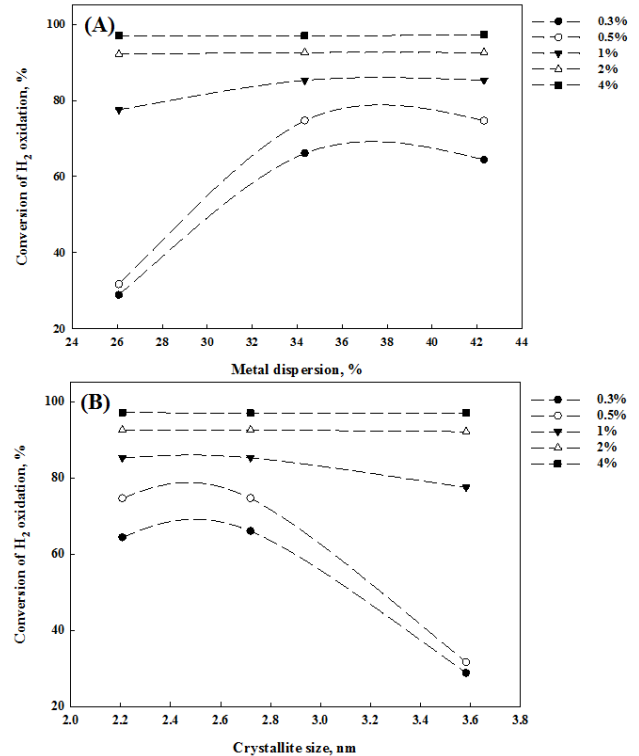
촉매의 H₂ 산화반응 성능이 가장 낮게 나타났다. 이러한 결과는 H₂ 산화반응에 있어서 단순히 촉매의 비표면적의 차이만으로는 촉매 특성을 대표할 수 없음을 나타낸다고 판단된다. 이에 본 연구에서는 TiO₂ 불순물이 촉매 성능에 미치는 영향을 확인하고자 하였다. 촉매들 중 성능이 가장 낮게 분석된 Pd/TiO₂ (G)에 첨가제(La₂O₃)를 1, 5, 10% 비율 별로 첨가한 Pd/La₂O₃-TiO₂ 촉매를 활용해 H₂ 산화실험을 진행하였다.

3.2. La₂O₃ 첨가에 따른 촉매의 H₂ 상온산화 반응 성능

Pd/La₂O₃-TiO₂ (L1, L5, L10) 촉매에 대한 H₂ 산화실험은 낮은 농도 조건에서의 H₂ 산화성능을 확인하기 위해 0.3% H₂ 농도부터 실험을 수행하였다. 실험 결과, La₂O₃을 첨가한 Pd/La₂O₃-TiO₂ 촉매들이 기존 촉매[Pd/TiO₂ (G)]에 비해 높은 전환율을 나타냄을 확인하였다(Figure 3). 또한 앞선 결과와 같이 주입되는 H₂ mole수가 증가할수록 촉매 성능이 향상되는 것을 확인하였으며, 0.3~0.5% H₂ 농도조건에서 각 촉매의 성능 구배가 뚜렷이 나타났다. 정량적인 H₂ 전환율 비교분석한 결과, 기존 Pd/TiO₂ (G) 촉매가 0.5% 농도조건에서 분석된 전환율(14%)에 비해 Pd/La₂O₃-TiO₂ (L1), Pd/La₂O₃-TiO₂ (L5) 촉매는 74%의 전환율로 5배 이상으로 촉매 성능이 증진된 것으로 평가되었다. 한편 La₂O₃ 함량이 더 높은 Pd/La₂O₃-TiO₂ (L10) 촉매의 전환율이 31%로 나타나, 촉매 성능이 첨가제 비율에 비례적으로 향상되는 것은 아닌 것으로 확인되었다. 이에 따라 La₂O₃ 첨가에 의한 촉매 물성 변화를 정확히 판단하고자, CO chemisorption 분석을 진행하였다.

3.3. 촉매의 CO chemisorption 결과

Pd/La₂O₃-TiO₂ 촉매의 CO chemisorption 분석결과는 Table 3과 같으며, 각 촉매별 metal dispersion, crystallite size가 H₂ 전환율에 미치는 영향을 분석하였다. Figure 4에서 볼 수 있듯이 성능 구배가 크게 나

**Figure 4.** The H₂ conversion of Pd/La₂O₃-TiO₂ catalysts with respect to H₂ concentration, (A) metal dispersion (B) crystallite size.

타난 0.3~0.5% H₂ 농도에서는 촉매의 metal dispersion이 일정 수준 이상일 때, H₂ 산화반응에 유리한 것으로 판단된다. 반면 주입되는 H₂ 농도가 증가함에 따라 촉매의 물성과는 상관없이 촉매의 H₂ 전환율이 증가하는 것을 보면, 1% 이상의 H₂ 농도 범위에서는 촉매의 물성보다는 반응에 참여하는 H₂의 mole수가 촉매 성능에 미치는 영향이 큰 것으로 판단된다. 즉, Pd/TiO₂ 및 Pd/La₂O₃-TiO₂ 촉매의 성능은 반응에 참여하는 H₂의 mole수에 비례하는 성질을 갖는 동시에 물질 전달이 촉매의 반응속도를 지배하는 H₂ 농도 범위가 함께 존재하는 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 Pd/TiO₂ 촉매를 기반으로 상온에서의 H₂ 산화반응을 평가하였고, 지지체로 사용된 TiO₂에 함유된 불순물 중에서 La₂O₃가 촉매의 H₂ 산화반응에 미치는 영향을 확인하였다. 해당 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

본 연구에서는 서로 다른 비표면적과 다양한 불순물들을 포함한 TiO₂로 제조된 Pd/TiO₂ 촉매들은 H₂ 산화 반응에서 성능 차이가 존재함을 확인하였다. 이때 촉매 성능은 TiO₂의 비표면적과 비례하지는 않았다. 또한 TiO₂ 종류에 따라 H₂ 산화반응에 대한 촉매 성능이 나타나지 않는 경우도 확인할 수 있었다.

비표면적보다는 La₂O₃가 Pd/TiO₂ 촉매에 첨가됨에 따라 Pd의 metal dispersion과 crystallite size와 같은 물성 변화가 H₂ 산화 반응에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 하지만 이때, 첨가되는 La₂O₃의 비율과 촉매 성능이 비례하는 것은 아니며, 적정 함량이 존재하는 것으로 사료된다.

마지막으로 1% 이상의 H₂ 농도조건에서는 촉매의 물성(metal dis-

persion, crystallite size)보다는 물질전달이 반응속도를 지배하는 것을 확인하였다.

감 사

본 연구는 2020학년도 경기대학교 대학원 연구원장학생 장학금 지원에 의하여 수행되었습니다.

References

1. I. Staffell, D. Scamman, A. V. Abad, P. Balcombe, P. E. Dodds, P. Ekins, N. Shah, and K. R. Ward, The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system, *Energy Environ. Sci.*, **12**, 463-491 (2019).
2. E. A. Reinecke, I. M. Tragsdorf, and K. Gierling, Studies on innovative hydrogen recombiners as safety devices in the containments of light water reactors, *Nucl. Eng. Des.*, **230**, 49-59 (2004).
3. S. Kelm, L. Schoppe, J. Dornseiffer, D. Hofmann, E. A. Reinecke, F. Leistner, and S. Jühe, Ensuring the long-term functionality of passive auto-catalytic recombiners under operational containment atmosphere conditions-. An interdisciplinary investigation, *Nucl. Eng. Des.*, **239**, 274-280 (2009).
4. S. J. Tauster, S. C. Fung, R. T. Baker, and J. A. Horsley, Strong interactions in supported-metal catalysts, *Science*, **211**, 1121-1125 (1981).
5. L. F. Liotta, G. Deganello, P. Delichere, C. Leclercq, and G. A. Martin, Localization of alkali metal ions in sodium-promoted palladium catalysts as studied by low energy ion scattering and transmission electron microscopy, *J. Catal.*, **164**, 334-340 (1996).
6. I. Y. Ahn, W. J. Kim, and S. H. Moon, Performance of La₂O₃- or Nb₂O₅- added Pd/SiO₂ catalysts in acetylene hydrogenation, *Appl. Catal. A: Gen.*, **308**, 75-81 (2006).
7. T. H. Fleisch, R. F. Hicks, and A. T. Bell, An XPS study of metal-support interactions on Pd/SiO₂ and Pd/La₂O₃, *J. Catal.*, **87**, 398-413 (1984).
8. R. F. Hicks and A. T. Bell, Effects of metal-support interactions on the chemisorption of H₂ and CO on Pd/SiO₂ and Pd/La₂O₃, *J. Catal.*, **89**, 498-510 (1984).
9. Y. S. Kang, S. S. Kim, G. J. Kim, and S. C. Hong, Pretreatment of Pd-supported catalysts for complete HCHO oxidation at room temperature, *J. Chem. Eng. Jpn.*, **49**, 460-465 (2016).
10. P. Panagiotopoulou and D. I. Kondarides, Effect of morphological characteristics of TiO₂-supported noble metal catalysts on their activity for the water-gas shift reaction, *J. Catal.*, **225**, 327-336 (2004).
11. V. P. Santos, S. A. C. Carabineiro, P. B. Tavares, M. F. R. Pereira, J. J. M. Orfao, and J. L. Figueiredo, Oxidation of CO, ethanol and toluene over TiO₂ supported noble metal catalysts, *Appl. Catal. B: Environ.*, **99**, 198-205 (2010).
12. S. A. Singh, K. Vishwanath, and G. Madras, Role of hydrogen and oxygen activation over Pt and Pd-doped composites for catalytic hydrogen combustion, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **9**, 19380-19388 (2017).
13. H. J. Choi, S. S. Kim, and S. C. Hong, Improving the activity of Mn/TiO₂ catalysts through control of the pH and valence state of Mn during their preparation, *J. Air Waste Manage. Assoc.*, **62**, 362-369 (2012).
14. S. S. Kim, K. H. Park, and S. C. Hong, A study on HCHO oxidation characteristics at room temperature using a Pt/TiO₂ catalyst, *Appl. Catal. A: Gen.*, **398**, 96-103 (2011).
15. C. Yang, J. Ren, and Y. Sun, Role of La₂O₃ in Pd-supported catalysts for methanol decomposition, *Catal. Lett.*, **84**, 123-129 (2002).
16. D. H. Kim, P. W. Seo, and S. C. Hong, Enhanced NH₃-SCR activity of V/TiO₂ catalyst prepared by various ball mill method, *Clean Technol.*, **23**(1), 64-72 (2017).
17. S. S. Kim, H. H. Lee, and S. C. Hong, The effect of the morphological characteristics of TiO₂ supports on the reverse water-gas shift reaction over Pt/TiO₂ catalysts, *Appl. Catal. B: Environ.*, **119-120**, 100-108 (2012).
18. P. W. Seo, S. P. Cho, S. H. Hong, and S. C. Hong, The influence of lattice oxygen in titania on selective catalytic reduction in the low temperature region, *Appl. Catal. A: Gen.*, **380**, 21-27 (2010).

Authors

Dong Yoon Lee; M.Sc., Master's Course, Department of Environmental Energy Engineering, Graduate School of Kyonggi University, Suwon 16227, Korea; 20191101114@kyonggi.ac.kr

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

Sang Moon Lee; Ph.D, Assistant Professor, Department of Environmental Energy Engineering, Kyonggi University, Suwon 16227, Korea; leesangm@kyonggi.ac.kr

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