

회분식 반응기에서 TiO₂ 광촉매의 MEK 분해 특성-금속담지 영향

장현태¹, 차왕석^{2*}

¹한서대학교 화학공학과, ²군산대학교 환경공학과

Characteristics of MEK Degradation using TiO₂ Photocatalyst in the Batch-type Reactor-Metal Doping Effect

Hyun Tae Jang¹, Wang Seog Cha^{2*}

¹Department of Chemical Engineering, Hanseo University

²Department of Environmental Engineering, Kunsan National University

요약 광촉매반응에서 티타니아에 금속물질을 담지하면 광촉매표면이 변화되며 담지된 금속물질은 반응속도를 증가시킨다. 회분식 광반응기를 이용하여 TiO₂ 광촉매에 대한 금속물질 담지와 담지된 촉매의 소성조건 영향을 조사하였다. 광분해 효율을 증진시키기 위해 TiO₂ 촉매에 여러 종류의 금속물질을 담지하였다. 모든 실험에서의 수분함량은 3wt%, 반응기 온도는 40°C이었다. TiO₂에 팔라듐을 담지한 경우가 가장 우수하였으며, Pt와 W를 첨가한 경우도 양호하였다. Pd/TiO₂ 촉매에 백금 또는 텅스텐을 부가적으로 담지하여도 제거효율에서의 증가는 없었다. 적절한 소성조건을 얻기위해 소성온도와 소성시간에 대하여 다양하게 실험을 수행하였으며, 실험결과 최적의 소성조건은 소성온도 400°C, 소성시간 1시간이었다.

Abstract In photocatalytic reaction, the doping of metal matter can alter the titania surface properties. As such the metal matter can increase the rate of the reaction. The influence of metal doping and calcination condition of TiO₂ photocatalyst was investigated at the batch-type photoreactor. Several metal matters were doped to the TiO₂ catalyst to improve photodegradation efficiency. During the experiments, water content was 3wt%, and reactor temperature was 40°C. Palladium-doped TiO₂ was found to be the best, where as platinum or tungsten-added also showed good results. Additional doping of platinum or tungsten on Pd/TiO₂ had no increase on the removal efficiency. To obtain proper calcination condition, various experiments about calcination temperature and time were carried out. As a result, the optimum calcination condition was temperature of 400°C, time of 1 hour.

Key Words : MEK(Methyl Ethyl Ketone), metal matter, calcination, photocatalyst

1. 서론

합성수지 페인트, 바닥광판 코팅제, 접착제 등을 생산하는 업체에서 배출되는 주요 휘발성유기화합물 중 하나는 methyl ethyl keton(MEK)와 methyl isobutyl keton(MIBK)으로 대표되는 케톤류 휘발성유기화합물이다. MEK는 무색의 쉽게 인화되는 인화성 액체로 아세톤과 유사한 자극적인 냄새가 나는 물질이며, MIBK는 자극적인 냄새보다는 불쾌한 냄새를 내는 물질로서, 인체

의 눈, 코, 목 등 얼굴 및 호흡기부분의 점막을 자극하는 물질이다[1,2].

휘발성유기화합물을 제거하는 기술로는 흡착, 흡수, 농축, 열소각, 생물학적 처리기술 등이 있으나 산업체에서 주로 적용되는 처리기술은 이 중에서 흡착, 열 및 촉매소각기술이다. 흡착기술은 폭발위험성이 있는 VOCs에 비교적 안전하게 적용되며 또한 경제적이나 케톤, 알데히드, 에스테르가 포함될 시 흡착제의 흡착능력이 감소하며 2차 오염물질인 폐흡착제가 발생하는 단점이 있

본 논문은 산업자원부 전략연구개발사업의 지원에 의해 이루어졌음.

*Corresponding Author : Wang Seog Cha(Kunsan Univ.)

Tel: +82-63-469-4765 email: wscha@kunsan.ac.kr

Received November 17, 2014 Revised (1st January 23, 2015, 2nd February 4, 2015) Accepted February 12, 2015

대[3]. 고온에서 조업되는 열 및 촉매소각기술은 적용기술이 많이 알려져 있어 다양한 VOCs에 대해 폭넓게 적용되고 있으나 과도한 초기투자비, 높은 운전비 등으로 인해 다소 처리비용이 높을 뿐만 아니라 폭발 위험성이 있는 단점이 있다[4,5].

일부 발생원에서 중·저농도 휘발성유기화합물이 수 시간 단위로 비연속적으로 배출되는 특징이 있으며, 이러한 발생원에서 발생하는 휘발성유기화합물을 대상으로 열소각이나 고온조업 촉매소각기술을 적용할 시 수 시간 단위로 처리장치 가동을 위한 화염 점화과정이 있어 사업장의 안전성, 제어장치 운영의 경제성 등을 포함한 결정적으로 취약한 단점이 있다. 최근에는 휘발성유기화합물을 포집하고 이송하는 기술을 포함한 배관공정 기술 등의 개선으로 발생농도가 중·저농도 수준이어서 상온에서 경제적으로 조업할 수 있는 촉매산화물의 개발이 절실한 실정이다[6].

UV/TiO₂ 광촉매 시스템은 이러한 관점에서 중·저농도의 휘발성유기화합물을 저온 또는 상온에서 2차 오염물을 발생시키지 않고 청정처리 할 수 있다는 장점 뿐만 아니라 초기투자비와 조업비가 저렴하다는 경제적인 장점도 함께 갖고 있다. 현재 중·저농도 휘발성유기화합물이 발생하는 많은 공정에서 친환경적인 처리를 위해 적용되고 있는 UV/TiO₂ 산화촉매는 TCE를 포함한 할로젠화합물을 함유한 탄화수소류의 분해에는 높은 활성을 보이나 일부 난분해성 유기화합물이 포함될 시 광산화촉매의 활성이 감소하여 적용에 어려움을 겪고 있다[7]. 많은 연구자들이 광산화촉매의 처리효율의 향상을 위해 광반응이 일어날 때 반도체인 TiO₂에서 발생하는 전자 및 정공의 재결합을 지연시키거나 반응을 활성화시키는 것으로 알려진 금속물질의 담지에 관한 연구를 활발히 진행하고 있다[8]. 현재까지 TiO₂ 광촉매에 다양한 금속물질을 담지시켜 광분해 효율을 높이려는 연구들이 많이 있었으며 대표적으로 많이 사용된 금속물질들이 Pd, Pt, W, Cu 등 이었다.

Sano 등[9]은 TiO₂ 광촉매에 Pt, Ag 등을 담지시켜 기상의 아세트알데히드 광분해특성을 조사하였으며 Pt를 담지할 경우 광효율 향상이 있음을 보고하였다. 박 등[8]이 발표한 논문에는 Pt, Au, Pd, As, Rh 등 다양한 금속물질 담지에 따른 분해효율 향상 메커니즘을 언급하였다. Korologos 등[10]은 Degussa사의 P-25 광촉매에 약 0.25wt%의 금속물질 즉 Pt, Fe, Ca을 담지시켜 방향족

휘발성유기화합물의 분해특성을 조사하였으며, Ca 첨가 시 높은 효율향상을 얻었음을 보고하였다. 김 등[11]은 아세트의 휘발성유기화합물의 제거에 Pd/TiO₂ 광촉매시스템이 높은 활성을 보임을 보고하였으며, 김 등[12]은 Pd가 담지된 TiO₂ 필름을 이용하여 기상 톨루엔을 제거하는 연구를 수행하였다.

따라서 본 연구에서는 대표적 휘발성유기화합물인 MEK를 효율적으로 처리할 수 있는 UV/TiO₂ 광촉매시스템을 도출하기 위해 Pd 등 각종 금속산화물의 담지에 따른 분해특성을 파악하였다. UV/TiO₂ 광촉매에 금속물질을 담지할 경우 반도체인 TiO₂와 보다 견고하게 부착할 수 있는 전처리조건 즉 소성조건도 조사하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 촉매제조

중류수에 분말형태의 촉매와 안정제를 투여한 후 충분히 분산시켜 촉매용액으로 제조하였다. 촉매개질에 사용된 각종 금속물질들은 TiO₂를 기준으로 무게단위로 투입하였다. 반응관의 촉매코팅은 반응관의 한쪽 끝은 밸브를 연결하고 다른 한쪽은 개방한 채 밸브 쪽이 아래 방향이 되도록 수직으로 고정하여 제조한 코팅용 sol용액으로 반응관을 가득 채운 후 관 하단의 밸브를 열어 용액이 배출되게 하여 관 내부를 코팅하였다. 이 때 용액의 선속도가 빠르거나 느리면 코팅이 균일하지 않으므로 코팅의 선속도는 5mm/min 정도로 하였다. 관 내부를 코팅한 후 용액이 반응기로부터 완전히 배출되면 코팅된 반응기는 자연건조 후 120°C의 dry oven에서 1시간동안 다시 건조되며, 건조 후 400°C의 가열로에서 1시간동안 소성과정을 거친다. Table 1에 촉매제조 조건을 요약하였다.

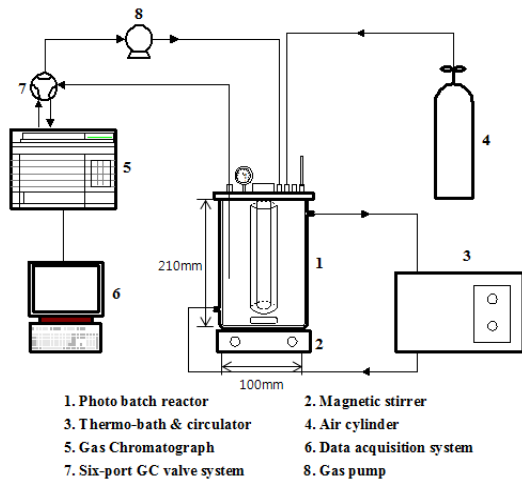
[Table 1] Conditions of photocatalyst preparation

| Photocatalyst | Sort | p-25 (Degussa, Germany) |
|-----------------------|-------------------------------------|----------------------------|
| | Concentration of photocatalyst(wt%) | 5 |
| metal matter | Sorts | Pt, Pd, W |
| | Doping concentration(wt%) | 1 |
| Dry condition | | 120°C, 1hr |
| Calcination condition | | 400°C, 1hr |

2.2 실험장치

대상 VOC의 광촉매 반응특성 연구를 수행하기 위한

반응기는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 내경 100mm, 높이 210mm, 부피가 약 1634cc이며, 석영관으로 구성되어 있다. 반응기 중심부에 수직으로 UV lamp를 삽입하고 그 외부에 촉매를 코팅한 석영관을 고정시켰으며 반응기 내의 온도를 일정하게 유지시키기 위해 항온조/순환장치를, 그리고 반응기 내의 농도가 균일하도록 반응기 하부에 magnetic stirrer를 설치하였다. 회분식 반응기에 사용한 UV lamp는 6W이며 파장은 254nm이었다.



[Fig. 1] Schematic diagram of bath photocatalytic reactor.

2.3 실험방법

반응기내를 공기분위기로 조성한 후 대상 VOC를 주입하였으며, 광촉매와 대상 VOC 간 흡착평형에 도달하면 UV광원을 조사하여 광분해변화를 측정하였다. 분석 방법은 반응기체가 펌프에 의해 순환되는 루프로부터 일정시간 마다 auto sampling valve를 이용하여 반응기체를 채취하여 gas chromatography(GC-FID)로 분석하였다. 실험 및 분석조건을 Table 2에 정리하였다.

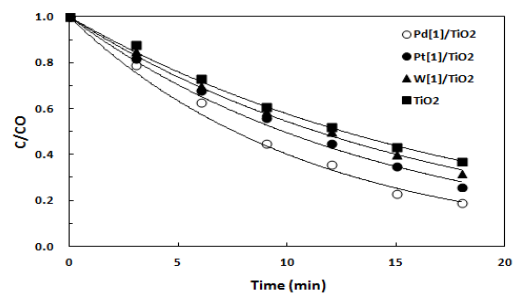
[Table 2] Conditions of reaction and analysis

| | | |
|---------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Reaction conditions | Temperature(°C) | 40 |
| | Concentration of MEK(ppm) | 500 |
| | Moisture content(%) | 3 |
| Analysis conditions of GC | Column | 10% di-n-decyl phthalate |
| | Column temperature(°C) | 200 |
| | Carrier gas | N ₂ |
| | Detector type | FID |

3. 결과 및 고찰

3.1 금속담지 TiO₂ 광촉매의 MEK 분해특성

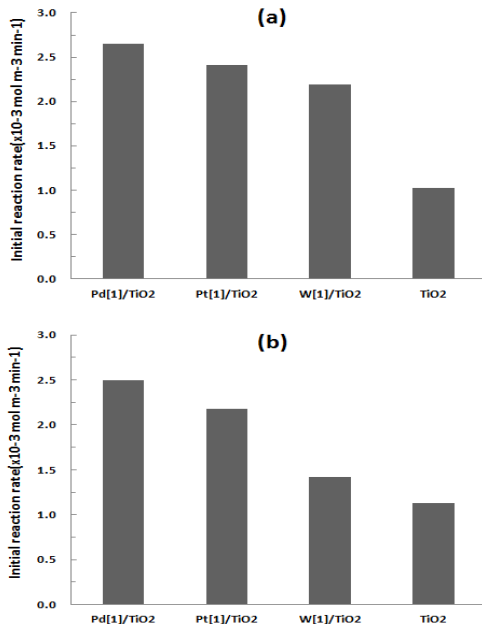
TiO₂ 광촉매에 금속물질을 담지하면 먼저 금속물질은 TiO₂ 광촉매에서 기존의 환경분야에 적용된 촉매시스템에서처럼 TiO₂는 담지체 혹은 보조제로서, 금속물질은 활성물질로 작용하여 광촉매시스템의 효율을 향상시키기도 한다. 그리고 TiO₂에 담지된 금속물질은 UV 등의 조사에 의해 발생한 전자들의 이동에 영향을 미치거나 전자와 정공간의 재결합을 지연시키는 역할을 수행한다. 이러한 역할을 수행하는 것으로 알려진 Pd, Pt, W을 TiO₂ 광촉매에 담지하여 광분해 효율변화를 조사하였으며, 실험결과를 Fig. 2에 나타내었다. 광분해 실험에 적용한 휘발성유기화합물은 MEK이었으며, 초기농도는 500ppm, 수분함량 3%이었다. 그림에서 전체적으로 금속물질을 첨가한 경우가 무첨가 경우보다 높은 MEK 제거 효율을 보였다. 금속물질을 첨가한 경우 반응초기 뿐만 아니라 반응전체에 걸쳐 TiO₂ 광촉매에 Pd를 첨가한 경우가 광분해 성능에서 가장 우수하였으며, 그 다음으로 Pt, W 순서이었다. Pt와 W의 경우 광분해 활성면에서 큰 차이는 없었다. 짧은 접촉시간에서 광촉매의 제거효율 정도를 나타내는 주요 지표가 초기반응속도, 즉 $(dc/dt)_{t=0}$ 이며, 광촉매반응기의 초기반응속도는 광촉매반응기의 크기, 제거효율, 운전비용 등에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다[13].



[Fig. 2] Photocatalytic degradation of MEK according to the metal-doped catalysts.

초기반응속도 특성을 보다 정량적으로 조사하고자 촉매담지금속별 반응시간에 따른 광분해 변화를 나타낸 Fig. 2를 사용하여 초기반응속도를 구하였으며 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 (a)의 경우, 적용된 휘발성유기화합물은 MEK이며, (b)의 경우 아세트알데히드

를 대상으로 한 반응시간에 따른 광분해변화 특성곡선을 통해 초기반응속도를 얻었으며, 반응조건은 MEK 경우와 동일한 초기농도 500ppm, 수분함량 3%이었다. MEK를 적용한 경우 전체적으로 초기반응속도는 TiO₂ 광촉매에 금속물질을 첨가하지 않은 경우보다 높았으며, 그 순서는 Pd>Pt>W>무첨가의 순서이었다. TiO₂ 광촉매에 Pd를 첨가한 경우 초기반응속도는 약 2.7×10^{-3} mol/m²·min 이었으나 광촉매에 금속물질을 첨가하지 않은 경우는 0.82×10^{-3} mol/m²·min 이었다. 초기반응속도 면에서 Pd/TiO₂계가 TiO₂계보다 약 3배 이상 우수하였다. 아세트알데히드를 적용한 경우도 MEK의 경우와 유사하게 전체적으로 금속물질을 첨가한 경우가 금속물질을 첨가하지 않은 경우보다 초기반응속도가 우수하였으며, 우수한 정도는 Pd>Pt>W>무첨가의 순서였다. TiO₂ 광촉매에 Pd를 첨가한 경우 초기반응속도는 약 2.5×10^{-3} mol/m²·min 이었으며, TiO₂ 광촉매에 금속물질을 첨가하지 않은 경우는 약 1.2×10^{-3} mol/m²·min 이었다. 초기반응속도 면에서 아세트알데히드의 경우 Pd/TiO₂계가 TiO₂계보다 약 2배가량 우수하였다.



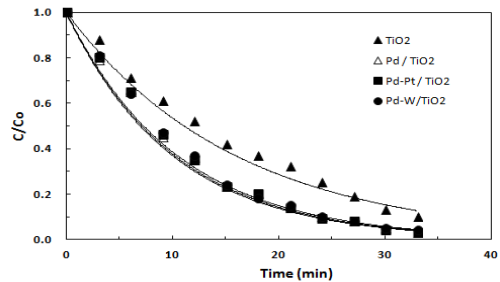
[Fig. 3] Initial reaction rate of photocatalytic degradation of MEK and acetaldehyde versus metal-doped catalysts(a : MEK, b : acetaldehyde).

광촉매에 금속을 담지 않은 경우보다 MEK 제거효율에 있어 우수한 것으로 나타난 금속물질을 대상으로 복

합적으로 제조합하였으며, 조합된 형태는 Pd-Pt/TiO₂, Pd-W/TiO₂ 이었다. 상기의 형태로 조합된 촉매시스템을 대상으로 MEK 제거효율변화를 측정하여 Fig. 4에 나타내었다.

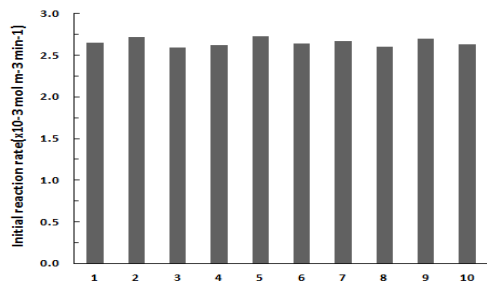
그림에서 전체적으로 하나 또는 두 종류의 금속물질을 담지한 경우가 금속물질을 담지하지 않은 경우에 비해 MEK 제거효율은 훨씬 우수하였다. Pd/TiO₂ 광촉매 시스템에 Pt 또는 W를 추가로 담지하여도 MEK 제거효율에서의 증가는 거의 없었으며, 이러한 결과는 Pd-Pt/TiO₂ 시스템을 이용하여 톨루엔의 광분해특성을 연구한 장 등[14]의 결과와 유사하였다.

TiO₂ 광촉매에 금속물질 첨가효과를 조사한 실험결과를 바탕으로 Pd/TiO₂ 광촉매를 제조하여 반복 사용에 따른 내구성 변화를 조사하였다. 실험은 동일한 조건에서 10회 반복 적용하였으며, 이때 MEK의 초기농도는 500ppm, 수분함량은 3% 이었다.



[Fig. 4] Photo degradation of MEK according to the additional metal doping on the Pd/TiO₂ catalyst.

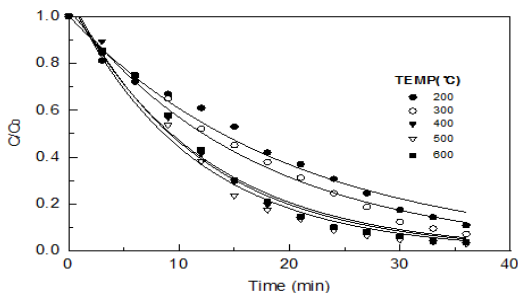
Fig. 5는 시간에 따른 MEK 변화곡선으로부터 구한 초기반응속도를 각 적용횟수별로 나타낸 그림이다. 전체적으로 동일한 실험조건하에서 10회 반복 사용하여도 Pd/TiO₂ 광촉매의 MEK 제거효율에서의 효율감소 현상은 거의 일어나지 않음을 알 수 있었다.



[Fig. 5] Photo degradation of MEK according to usage times for Pd/TiO₂ catalysts.

3.2 TiO₂ 광촉매에 대한 소성조건의 영향

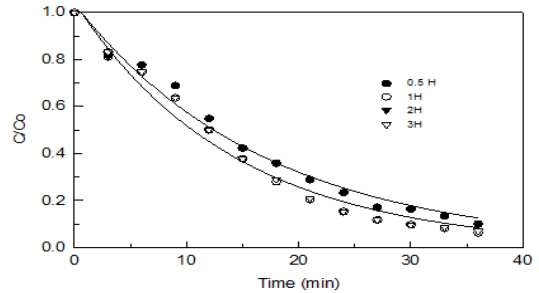
일반적으로 TiO₂ 광촉매는 크게 anatase형 또는 rutile형 구조를 갖고 있으며, anatase형 구조가 rutile형 구조에 비해 큰 표면적을 가지며 촉매활성면에서도 보다 더 우수한 것으로 알려져 있다. TiO₂ 광촉매는 촉매의 산화가 등을 변화시키는 과정인 소성과정에서 소성온도 600°C 이상에서는 결정구조가 anatase형에서 rutile형으로 변하는 것으로 보고되고 있다. 그리고 미세한 분말형태의 TiO₂ 광촉매를 파이렉스 또는 석영관에 코팅하기 위해 바인더를 첨가시키는데 이러한 바인더는 소성과정에서 TiO₂ 분말입자와 파이렉스관과의 접촉을 더욱 강하게 유지시킬 뿐만 아니라 코팅된 표면도 비교적 균일한 형태를 유지할 수 있도록 해준다. TiO₂ 광촉매에 금속물질을 담지하는 경우 소성온도는 광촉매의 결정상태와 산화가를 변경시키는 주요한 요인이므로 적절한 소성조건의 조사는 매우 중요하다. TiO₂ 광촉매에 금속물질 담지시 MEK 제거효율에 있어 가장 우수한 것으로 나타난 Pd/TiO₂ 광촉매를 사용하여 소성온도에 따른 MEK 제거효율 변화를 조사하여 Fig. 6에 나타내었다. 광분해반응 실험에서 적용한 실험조건은 MEK 농도 500ppm, 수분함량 3%로 하였다. 전체적으로 소성온도가 200°C에서 400°C까지의 온도범위에서는 소성온도가 증가할수록 MEK 제거효율 또한 증가하였다. 그러나 소성온도 400°C 이상의 온도범위에서는 소성온도가 증가하여도 MEK 제거효율에서는 거의 변화가 없었다. 소성온도 200°C에서의 MEK 제거효율은 약 87%, 소성온도 400°C에서의 MEK 제거효율은 약 97% 이었다.



[Fig. 6] Photocatalytic degradation of MEK according to calcination temperature.

소성조건 중 소성온도와 더불어 또 다른 중요한 반응 변수가 소성시간이다. Fig. 7은 최적소성시간을 파악하기 위해 Pd/TiO₂ 광촉매를 사용하여 소성시간에 따른 MEK

제거효율 변화를 나타낸 그림이다. 광분해반응 실험조건은 MEK농도 500ppm, 수분함량 3%이었으며, 반응관에 코팅된 Pd/TiO₂ 광촉매의 소성온도는 공히 400°C이었다. 전체적으로 소성시간 1시간 범위에서 소성시간이 증가할수록 MEK 제거효율도 증가하였으나, 소성시간 1시간 이후의 범위에서는 소성시간이 증가하여도 MEK 제거효율에서는 거의 변화가 없었다. 따라서 Pd/TiO₂ 광촉매의 소성조건은 소성온도 400°C, 소성시간은 1시간임을 알 수 있었다.



[Fig. 7] Photocatalytic degradation of MEK according to calcination time.

4. 결론

TiO₂ 광촉매에 금속물질 담지효과, 금속물질 담지 촉매의 소성조건에 따른 MEK 제거특성을 조사하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. TiO₂ 광촉매의 MEK 제거효율 향상을 위해 담지한 금속물질 중 Pd가 가장 우수하였으며, Pt와 W를 첨가한 경우도 양호하였다.
2. Pt, W의 금속물질을 Pd/TiO₂ 광촉매에 추가적으로 담지하여도 MEK 제거효율에서의 증가는 없었다.
3. Pd/TiO₂ 광촉매를 동일한 조건에서 10회 반복 적용하여도 MEK 광분해 효율에서의 변화는 거의 일어나지 않았다.
4. Pd/TiO₂ 광촉매의 최적 소성조건은 소성온도 400°C, 소성시간 1시간이었다.

References

- [1] J. Amooore, E. Hautala, "Odor as an aid to chemical safety: odor thresholds compared with threshold limit

values and solilities for 214 industrial chemicals in air and water dilution”, *J. Appl. Toxicol.*, 3, 272-290, 1983.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/jat.2550030603>

[2] M. J. Kim, T. H. Lee, H. W. K. M. Lee, Ryu, K. S. Cho, “Degradation characteristics of methyl ethyl ketone and methyl isobutyl ketone by pseudomonas putida KT-3”, *Kor. J. Microbiol. Biotechnol.*, 30(4), 395-401, 2002.

[3] S. Y. Noh, K. H. Kim, J. H. Choi, S. D. Han, I. S. Kil, D. H. Kim, Y. W. Rhee, “Adsorption characteristics of VOCs in activated carbon beds”, *J. KOSAE*, 24(4), 455-469, 2008.

[4] L. Yue, H. Chi, Z. Xinyan, L. Peng, W. Zhuo, W. Hailin, H. Zhengping, “Catalytic behavior and reaction routes of MEK oxidation over Pd/ZSM-5 and Pd-Ce/ZSM-5 catalysts”, *Journal of Hazardous Materials*, 244-245, 613-620, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.10.048>

[5] S. G. Seo, Z. K. Ma, Y. Liu, H. S. Yoon, S. C. Kim, “Catalytic characteristics of Mn-PC for VOCs combustion”, *Journal of KSEE*, 33(4), 237-242, 2011.

[6] T. Ochiai, A. Fujishima, “Photoelectrochemical properties of TiO₂ photocatalyst and its applications for environmental purification”, *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 13, 247-262, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2012.07.001>

[7] S. B. Kim, Y. M. Jo, W. S. Cha, “Effects of Water Vapor, Molecular Oxygen and Temperature on the Photocatalytic Degradation of Gas-Phase VOCs using TiO₂ Photocatalyst: TCE and Acetone”, *J. KOSAE*, 17(E2), 35-42, 2001.

[8] H. W. Park, Y. S. Park, W. Y. Kim, W. Y. Choi, “Surface modification of TiO₂ photocatalyst for environmental applications”, *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 15, 1-20, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2012.10.001>

[9] T. Sano, N. Negishi, K. Uchino, J. Tanaka, S. Matsuzawa, K. Takeuchi, “Photocatalytic degradation of gaseous acetaldehyde on TiO₂ with photodeposited metals and metal oxides”, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 160, 93-98, 2003.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S1010-6030\(03\)00226-0](http://dx.doi.org/10.1016/S1010-6030(03)00226-0)

[10] C. A. Korologos, M. D. Nikolaki, C. N. Zerva, C. J. Philippopoulos, “Photocatalytic oxidation of benzene, toluene, ethylbenzene and m-xylene in the gas-phase over TiO₂-based catalysts”, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 244, 24-31, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jphotochem.2012.06.016>

[11] S. B. Kim, J. Y. Lee, H. T. Jang, W. S. Cha, S. C. Hong, “Enhanced photocatalytic activity of TiO₂ by metal doping for degradation of VOCs in air”, *Journal of Industrial and engineering chemistry*, 9(4), 440-446, 2003.

[12] J. H. Kim, Z. Pengyi, L. Jinge, W. Jinlong, F. Pengfeng, “Photocatalytic degradation of gaseous toluene and ozone under UV₂₅₄₊₁₈₅ nm irradiation using a Pd-deposited TiO₂ film”, *Chemical Engineering Journal*, 252, 337-345, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2014.05.015>

[13] W. S. Cha, “Photocatalytic degradation of acetaldehyde and MEK using batch type photo-reactor”, *J. of Korea Academic-Industrial Cooperation Society*, 14(3), 1527-1532, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2013.14.3.1527>

[14] H. T. Jang, J. K. Kim, W. S. Cha, “The performance of photocatalyst filter for an air cleaner-effect of novel metal”, *J. of Korea Academic-Industrial Cooperation Society*, 7(6), 1284-1291, 2006.

차 왕 석(Wang-Seog Cha)

[정회원]



- 1981년 8월 : 고려대학교 화학공학과(공학사)
- 1985년 2월 : 고려대학교 화학공학과(공학석사)
- 1993년 8월 : 고려대학교 화학공학과(공학박사)
- 1994년 3월 ~ 현재 : 군산대학교 토목환경공학부 교수

<관심분야>
폐기물 가스화 및 열분해

장 현 태(Hyun-Tae Jang)

[종신회원]



- 1986년 2월 : 고려대학교 화학공학과(공학사)
- 1991년 8월 : 고려대학교 화학공학과(공학석사)
- 1996년 2월 : 고려대학교 화학공학과(공학박사)
- 1994년 3월 ~ 현재 : 한서대학교 화학공학과 교수

<관심분야>
흡착, 유동층반응