

금속물질로 개질된 광촉매를 이용한 톨루엔 광분해특성 연구

장현태¹, 차왕석^{2*}

¹한서대학교 화학공학과, ²군산대학교 환경공학과

Study of the Photodegradation Properties of Toluene using Photocatalysts Modified by Metal Matter

Hyun Tae Jang¹, Wang Seog Cha^{2*}

¹Department of Chemical Engineering, Hanseo University

²Department of Environmental Engineering, Kunsan National University

요약 광촉매 반응에서 TiO₂에 금속물질을 첨가하면 촉매표면이 변화되며, 이러한 금속물질은 광분해반응의 속도를 증가시킨다. 본 연구에서는 TiO₂ 광촉매의 광분해능력을 향상시키기 위해 다양한 방법을 이용하여 개질하였으며, 개질된 광촉매의 광분해특성은 회분식 광반응기를 이용하여 조사하였다. 우수한 TiO₂ 광촉매용액을 얻기 위해 여러 종류의 분산제와 안정제를 조사하였으며, 분산제로는 isopropyl alcohol, 안정제로는 sodium silicate가 적합하였다. 톨루엔 분해반응을 향상시키기 위해 다양한 금속물질을 TiO₂ 광촉매에 첨가하여 광분해효율을 조사한 결과 Pd가 가장 우수하였으며, Cu와 W도 우수하였다. Pd를 첨가한 경우 25%의 제거효율 향상이 있었다. 그러나 Fe의 경우 광촉매분해반응을 상당히 저해하는 것으로 나타났다. Pd/TiO₂ 광촉매에 Cu 또는 W를 부가적으로 첨가하여도 촉매의 광분해효율에는 증가가 없었다.

Abstract In photocatalysis, the addition of metal matter to TiO₂ can alter the surface properties. As such, the metal can increase the rate of the photodegradation reaction. In this study, a range of modified TiO₂ photocatalysts were prepared and tested to improve the activity of photodegradation at a batch-typed photoreactor. To obtain a good sol solution of the TiO₂ photocatalyst, several types of dispersion agents and stabilizers were investigated. The photocatalyst solutions were modified with isopropyl alcohol as the dispersion agent and sodium silicate as the stabilizer. The effects of various metallic elements on enhancing the photocatalytic activity of TiO₂ on the degradation of toluene were examined. Palladium-added TiO₂ was found to be the best, whereas copper or tungsten-added also showed good results. In the case of palladium addition, the increase in removal efficiency was 25%. On the other hand, Fe-added TiO₂ showed a notable decrease in photocatalytic degradation. Additional doping of copper or tungsten on the Pd/TiO₂ had no positive effect on the photodegradation activity.

Key Words : Toluene, metal species, modified, photocatalyst, batch type

1. 서론

다양한 산업 및 서비스시설에서 발생하는 휘발성유기 화합물(VOCs : Volatile Organic Compounds)은 강한 자외선에 의해 광반응을 일으켜 오존, 알데하이드, PAN(p-oxyacethlnitrate)등과 같은 유해 2차 오염물질을

생성하여 VOCs의 제어는 대기환경보전에 있어 매우 중요한 연구분야가 되어 왔다.

현재 적용되고 있는 휘발성유기화합물의 제어기술은 열소각, 흡착법, 촉매소각법 등이 있으나 열소각법은 부하변동이 크고 저농도이며 낮은 유량인 경우 비경제적이며 NOx/dioxin이 발생하는 단점이 있으며 흡착법은 케

이 논문은 산업자원부 전략연구개발사업의 지원에 의해 이루어졌음.

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

Tel: +82-11-9641-4765 email: wscha@kunsan.ac.kr

Received July 10, 2014

Revised August 6, 2014

Accepted November 6, 2014

톤, 알데히드, 에스테르가 포함될 시 흡착제의 흡착능력이 감소하며 폐흡착제가 발생하는 단점이 있다. 현재 적용이 점차 증가하고 있는 고온에서 조업되는 촉매소각법은 각 촉매 및 휘발성유기화합물 종류별로 다음과 같은 단점이 있어 적용에 제한성이 있다. 탄화수소류의 경우 Pt 등으로 처리가능하나 다른 종류의 휘발성유기화합물이 혼입될 시 처리효율이 낮으며 할로젠유기화합물이 포함될 시 처리효율은 급격히 감소하는 경향이 있으며, 아민류의 경우 Pd, Ce, Mn, Co계 등이 사용되나 황에 대한 내피독성이 낮고, N₂에 대한 선택도가 낮아 NO_x가 발생하는 문제점이 있다[1,2]. 그리고 할로휘발성유기화합물류의 경우 Pt, Cr계가 사용되나 독성물질인 PhCl_x가 생성되거나 휘발물질인 CrCl_xO_y 착화물이 생성되어 처리효율이 상당히 낮은 수준을 유지하며, 메르캅탄류의 경우 Pt나 V₂O₅계가 사용되나 다른 휘발성유기화합물에 대한 산화능이 상대적으로 낮다는 단점이 있다[3,4].

고온에서 조업되는 촉매산화법은 비교적 낮은 유량의 중·저온 휘발성유기화합물의 제거에 적용하기에는 과다한 초기투자비, 높은 운전비 등으로 인해 비경제적이며, 폭발 위험성이 있는 공정에 적용하기에는 많은 위험요소가 있다. 또한 공장내 작업장에서 발생하는 휘발성유기화합물의 제거에 고온조업 촉매산화법을 적용할 시 비교적 높은 온도에서 조업하며 사용되는 촉매 가격이 높아 경제성이 다소 떨어지는 면이 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 다양한 종류의 고급산화공정(Advanced Oxidation Process : AOPs) 기술이 연구되고 있으며, 그 중에서도 UV/TiO₂ 광산화촉매를 이용한 휘발성유기화합물 처리에 관한 연구가 크게 주목을 받고 있다[5,6]. UV/TiO₂ 광촉매 시스템은 중·저농도의 휘발성유기화합물을 저온 또는 상온에서 청정 처리할 수 있는 환경적인 장점 뿐만 아니라 초기투자비와 조업비가 저렴하다는 경제적인 장점도 함께 갖고 있다.

현재 중·저농도 휘발성유기화합물의 제거를 위해 일부에서 사용되고 있는 TiO₂ 산화촉매는 할로젠화합물을 함유한 탄화수소류(TCE 등)의 분해에는 우수하나 톨루엔, 아민계 혹은 황계 휘발성유기화합물이 함유될 시 산화촉매의 활성이 감소하여 적용에 어려움을 겪고 있다. 각기 다른 특성을 갖는 휘발성유기화합물을 적절하게 처리하기 위해서는 촉매의 설계가 필요하며 특히 UV/TiO₂ 광촉매 시스템을 넓은 범위의 조건에서 높은 효율을 갖기 위해서는, 먼저 적용하고자 하는 대상공정에서 발생

되는 휘발성유기화합물에 적합한 촉매산화물을 선정하여야 하며[7], 두 번째는 TiO₂와 혼합되는 다른 특성을 갖는 촉매산화제를 뭉침 없이 분산시킬 수 있는 적절한 분산제의 선정이 우선되어야 하며, 세 번째는 TiO₂와 혼합된 촉매산화제가 반응기 등에서 충분한 내구성 및 부착성을 가질 수 있는 안정제를 선정하여야 한다. 부가하여 난분해성을 포함하여 휘발성유기화합물의 분해능을 촉진하기 위해 적절한 금속산화물의 첨가도 필요하다[8-13].

따라서 본 연구에서는 UV/TiO₂ 광촉매 시스템을 사용하여 TiO₂ 등을 포함한 다양한 금속산화물을 적절하게 분산시킬 수 있는 분산제, 반응기내의 여러 조업조건에서도 적절한 효율을 유지시켜 주는 안정제의 특성을 연구하였으며, 대표적 난분해성 휘발성유기화합물인 톨루엔을 효율적으로 처리할 수 있는 촉매시스템을 도출하기 위해 각종 금속산화물 첨가 영향을 조사하였다.

2. 실험장치 및 방법

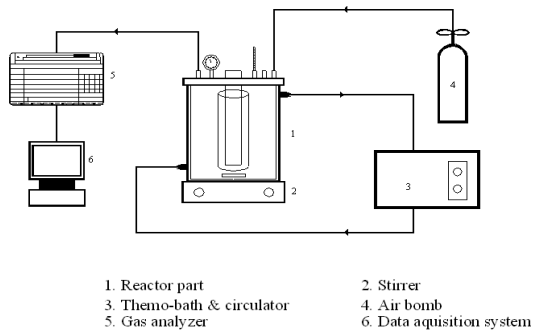
2.1 촉매제조

분말상의 촉매를 증류수에 일정농도로 투여한 후 sonicator를 사용하여 충분히 분산시킨 후 분산제와 안정제를 첨가하여 재분산시켜 촉매용액으로 제조하였다. 촉매개질에 사용된 각종 금속물질들은 TiO₂를 기준으로 무게단위로 주입하였다. 반응관의 촉매코팅은 반응관의 한쪽 끝은 밸브를 연결하고 다른 한쪽은 개방한 채 밸브 쪽이 아래 방향이 되도록 수직으로 고정하여 세운다. 제조한 코팅용 sol용액으로 반응관을 가득 채운 후 관 하단의 밸브를 열어 용액이 배출되게 하여 관 내부를 코팅하는 방식으로 dip coating과 원리가 유사하다. 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℃의 dry oven에서 1시간동안 다시 건조되며, 건조 후 400℃의 가열로에서 2시간동안 소성과정을 거친다.

2.2 실험장치

우선 대상 VOC의 광촉매 반응특성, 즉 kinetics 연구를 수행하기 위한 반응기는 Fig. 1에 나타난 바와 같이

내경 100mm, 높이 210mm, 부피가 약 1634cc이며, 석영 관으로 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 균일 하도록 반응기 하부에 magnetic stirrer를 설치하였다. 회분식 반응기에 사용한 UV lamp는 6W이며 파장은 254nm이었다.



[Fig. 1] Schematic diagram of batch-type photocatalytic reactor.

2.3 실험방법

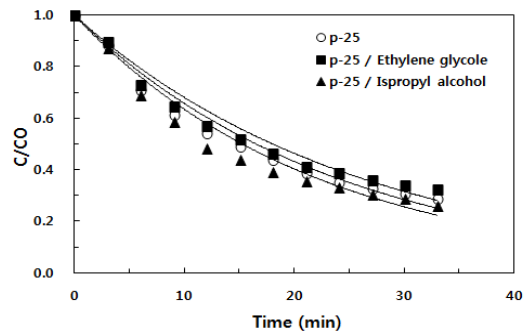
광촉매반응기에 촉매가 담지된 석영관을 장착한 후 공기 유입구와 유출구를 개방한 채 충분히 공기를 통과시켜 공기분위기를 만든 후 반응기 내를 대기압 조건으로 조성한 후 반응 대상 VOC 물질을 주입하였다. 광촉매와 VOC 대상 물질간 흡착평형에 도달한 후 UV 광원을 조사하여 반응물질에 대한 광반응성을 측정하였다. 다양한 분산제, 안정제, 금속물질 등의 첨가를 통해 얻어진 광분해능을 갖는 석영관을 각 실험조건에 따라 주입하였다. 분석 방법은 auto sampling valve를 이용하여 반응기체를 일정시간 마다 gas chromatography(GC-FID)로 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 TiO₂ 광촉매에 대한 분산제 및 안정제의 영향

고체 분말형태의 상용광촉매인 TiO₂를 포함한 다양한 금속물질을 증류수에 분산시켜 광촉매를 개질하고자 할

때 고체입자들의 전기화학적 특성들로 인해 종종 입자간 뭉침현상이 발생하여 광촉매 혼합액의 지지체에서의 코팅과정을 원활하게 수행하지 못하게 하거나 지지체 표면에 심한 표면 뭉침현상을 야기시키기도 한다. 이러한 표면에서의 뭉침현상은 광촉매 활성을 저해시키는 요인으로 작용하기도 한다. 따라서 도로분야를 포함한 분체 산업분야에서 분산제로 널리 사용되고 있는 isopropyl alcohol과 ethylene glycol을 이용하여 TiO₂ 광촉매를 분산시킨 후 UV/TiO₂ 광반응시스템에서 광분해 특성을 조사하였다. Fig. 2는 isopropyl alcohol과 ethylene glycol로 분산시킨 TiO₂ 광촉매의 시간에 따른 톨루엔의 광분해 변화를 나타낸 그림이다.

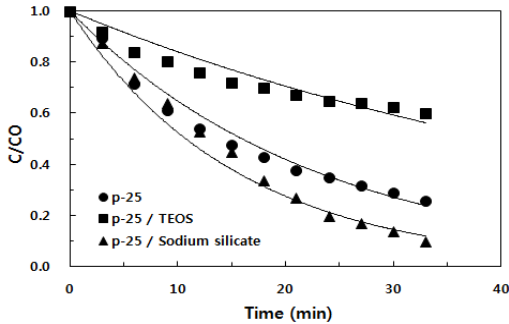


[Fig. 2] The effect of dispersion agents on the TiO₂ photocatalyst.

그리고 TiO₂를 보다 더 우수하게 분산시키기 위해 주입한 분산제 중 ethylene glycol의 경우 오히려 광분해 반응을 저해하는 것으로 나타났으며, isopropyl alcohol의 경우 분산제를 첨가하지 않은 경우보다 반응시간 전체에 걸쳐 초기분해속도를 비롯하여 광분해 효율이 보다 더 우수함을 알 수 있었다. UV/TiO₂ 광촉매반응시스템은 비록 상온에서 광분해 반응이 이루어지나 적용 대상공정에 따라 비교적 높은 유속, 높은 수분함량, 장시간 UV조사 등의 공정조건이 예상되므로 이러한 공정조건에서 장시간 높은 활성을 유지시켜 주는 안정제가 필요하다. 또한 분말형태의 TiO₂ 광촉매의 경우 거의 대부분 석영 또는 pyrex로 이루어진 투명재질의 지지체에 코팅되어 사용되는데 광촉매의 지지체에의 부착 견고성 정도가 광촉매반응기의 장기간 사용여부에 중요한 변수로 작용한다.

Fig. 3은 접착성과 안정성을 향상시켜 주는 것으로 알려진 TEOS(Tetraethoxy silane)와 sodium silicate로 분

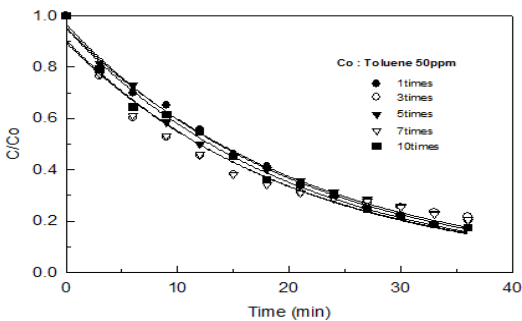
산시킨 각각의 TiO₂ 광촉매를 대상으로 시간에 따른 톨루엔의 광분해 변화를 나타낸 그림이다.



[Fig. 3] The effect of stabilizers on the TiO₂ photocatalyst.

그림에서 분말형태의 TiO₂ 촉매를 안정화시키는 것으로 알려진 TEOS의 경우 안정제를 첨가하지 않은 경우보다 약 50% 이상 광분해 효율 감소현상이 나타났으며, sodium silicate를 첨가한 경우 무첨가의 경우보다 반응 시간 10분 이후부터 광분해 효율이 점차 증가하여 반응 시간 약 40분에서는 10% 정도의 광분해 효율향상이 있었다. 이러한 현상은 TEOS의 경우 TiO₂와 가교를 형성하는 binder 역할을 수행하지 못하고 분말형태의 TiO₂ 표면을 coating 하여 촉매산화물의 비활성화를 유도하기 때문이며, sodium silicate의 경우는 TiO₂와 가교를 형성하기 때문이다. 이러한 가교현상은 pyrex 지지체 표면에의 견고한 부착상태의 육안 관찰로도 확인할 수 있었다.

분산제 및 안정제의 역할을 조사한 실험결과를 바탕으로 TiO₂ 광촉매를 제조하였으며, 제조한 광촉매를 사용하여 동일한 반응조건에서 반복 사용함에 따른 광분해 변화 특성을 조사한 실험결과를 Fig. 4에 나타내었다.

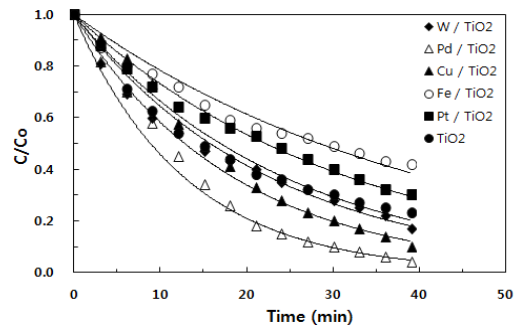


[Fig. 4] Photocatalytic degradation of toluene according to usage times.

이때 수행한 광분해반응 실험조건은 톨루엔 함량 50ppm, 수분함량 3% 이었다. 그림에서 동일한 실험조건 하에서 10회 반복 사용하여도 전체적으로 TiO₂ 광촉매의 톨루엔에 대한 광분해 효율은 거의 변화가 없음을 알 수 있었다.

3.2 TiO₂ 광촉매에 대한 금속물질 첨가 효과

일반적으로 상온영역에서 중·저농도 휘발성유기화합물을 제거하기 위해 일부에서 적용되고 있는 TiO₂ 광촉매는 할로겐화합물을 함유한 탄화수소류 특히 세척용매로 많이 사용되고 있는 TCE의 분해에는 우수하나 톨루엔을 포함한 방향족화합물의 경우에는 낮은 활성능력을 보이고 있어 실제 적용을 하고자 할 때 어려움을 겪고 있다[6]. 산화촉매인 TiO₂ 광촉매 단독으로도 휘발성유기화합물의 제거가 가능하나 휘발성유기화합물을 배출하는 배출원 중 상당부분의 경우 점차 발생하는 휘발성유기화합물의 종류가 다양해지고 복잡해짐에 따라 넓은 범위에서 보다 높은 효율을 갖는 TiO₂ 광촉매 시스템이 요구되고 있다. 이러한 요구에 따라 TiO₂ 광촉매 시스템의 광분해 효율을 높이기 위해 다양한 종류의 금속물질을 첨가하고 있다. 전이금속이 TiO₂ 광촉매에 첨가되면 광촉매는 전자-정공쌍이 생성된 후 전자가 금속으로 이동하여 산화반응에 참여하게 되나 실제적으로 한정된 금속이온만이 전자-정공의 재결합을 지연시키는 것으로 알려져 있다[8]. 본 연구에서는 TCE, 아세톤 등의 휘발성유기화합물에 대한 광분해 효율을 향상시키는 것으로 알려져 있는 Pt, Pd, Fe, W를 TiO₂ 광촉매에 첨가하여 대표적 난분해 휘발성유기화합물인 톨루엔에 대한 각 첨가 금속물질의 광분해 효율 변화를 조사하였으며, 실험결과를 Fig. 5에 나타내었다.

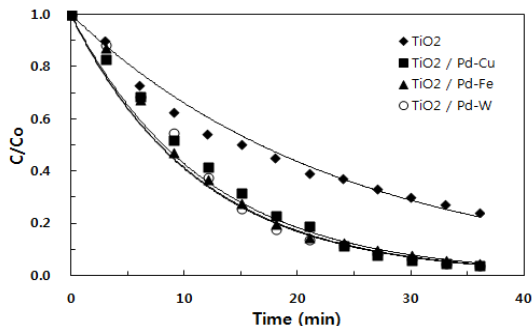


[Fig. 5] Photocatalytic degradation of toluene according to the metal-added TiO₂ catalysts.

TiO₂ 광촉매를 이용한 광분해 반응실험에 적용한 실험조건은 톨루엔 농도 50ppm, 수분함량 3%로 하였다. 그림에서 W, Cu, Pd를 TiO₂ 광촉매에 첨가한 경우 금속물질을 첨가하지 않은 경우보다 전체적으로 광분해 효율이 증가함을 알 수 있었다. 특히 Pd를 첨가한 경우 광분해반응 개시 후 약 36분경에 약 93%의 제거율을 보일 정도로 우수하였다. 이때 금속물질을 첨가하지 않은 경우는 약 71%의 제거율을 보였다. 그리고 Pt 또는 Fe를 첨가한 경우는 무첨가의 경우에 비해 오히려 광분해 효율을 감소시키는 것으로 나타났다. 특히 Fe의 경우 톨루엔 제거효율이 약 55% 수준이었다. 2종류 이상의 금속물질이 첨가될 경우 광분해 과정 중 첨가된 각 금속물질 간 시너지효과 발생여부를 조사하기 위해 톨루엔 제거효율에 있어 가장 우수한 Pd/TiO₂ 광촉매에 Cu, Fe, W를 첨가하여 2종류의 금속물질 첨가 효과를 파악하고자 하였다.

Fig. 6은 2종류의 금속물질이 첨가된 각 경우에 대한 톨루엔 제거효율 변화를 나타낸 그림이다.

그림에서 Pd/TiO₂ 광촉매에 광촉매 효율을 향상시키는 것으로 나타난 금속물질 Cu, W를 복합적으로 첨가시켜도 Pd/TiO₂ 촉매시스템과 유사한 톨루엔 제거효율을 보였다.



[Fig. 6] Photocatalytic degradation of toluene according to the addition doping of metallic elements on the Pd/TiO₂.

4. 결론

회분식 광촉매반응기를 이용하여 TiO₂ 광촉매에 분산제, 안정제 그리고 금속물질 첨가에 따른 톨루엔 광분해 특성을 조사하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 분말형태인 TiO₂ 광촉매를 sol용액으로 제조시 분산제로는 isopropyl alcohol, 안정제로는 sodium silicate가 적합하였다.
2. TiO₂ 광촉매의 광분해능력의 향상을 위해 첨가한 금속물질 중 Pd가 가장 우수하였으며, 그다음으로는 Cu, W 순이었다.
3. Pd/TiO₂ 광촉매에 추가적으로 Cu, W의 금속물질을 첨가하여도 톨루엔 제거효율에서의 증가는 없었다.

References

- [1] Yue Lin, Chi He, Xinyan Zhang, Peng Li, Zhuo Wang, Hailin Wang, and Zhengping Hao(2013), 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.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.10.048>
- [2] Huang Qiong, Yan xiaokang, Li Bing, Chen Yingwen, Zhu Shemin, Shen Shubao(2013), Study on catalytic combustion of benzene over cerium based catalyst supported on cordierite. *Journal of Rare Earths*, 31(2): 124-130.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S1002-0721\(12\)60245-2](http://dx.doi.org/10.1016/S1002-0721(12)60245-2)
- [3] Gallastegi-villa, M., M. Romero-Sáez., A. Aranzabal, J.A. González-Marcos, and J.R. González-Velasco(2013), Strategies to enhance the stability of h-bea zeolite in the catalytic oxidation of Cl-VOCs:1,2-Dichloroethane. *Catalysis Today*, 213: 192-197.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cattod.2013.02.022>
- [4] Yang, Peng, Xiaomin Xue, Zhonghua Meng, and Renxian Zhou(2013), Enhanced catalytic activity and stability of Ce doping on Cr supported HZSM-5 catalysts for deep oxidation of chlorinated volatile organic compounds. *Chemical Engineering Journal*, 234: 203-210.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2013.08.107>
- [5] Kim, S.B., Y.M. Jo, and W.S. Cha(2001), 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.
- [6] Kim, S.B., W.S. Cha, and S.C. Hong(2002), Photocatalytic Degradation of Gas-Phase Methanol and Toluene Using Thin-Film TiO₂ photocatalyst II. Kinetic Study for the Effect of Initial Concentration and Photon Flux. *J. Ind. Eng. Chem.*, 8(2), 162-167.

- [7] Cha, W. S.(2013), Photocatalytic degradation of acetaldehyde and MEK using batch type photo-reactor. *J. of Korea Academic-Industrial Cooperation Society*, 14(3), 1527-1532.
- [8] Kim, S.B., J.Y. Lee, H.T. Jang, W.S. Cha, and S.C. Hong(2003), Enhanced photocatalytic activity of TiO₂ by metal doping for degradation of VOCs in air, *Journal of Industrial and engineering chemistry*, 9(4): 440-446.
- [9] Jang, H.T., J. Kim, and W. Cha(2006), The performance of photocatalyst filter for an air cleaner—effect of novel metal, *J. of Korea Academic-Industrial Cooperation Society*, 7(6), 1284-1291.
- [10] Zielińska-Jurek, Anna, and Adriana Zaleska(2014), Ag/Pt-modified TiO₂ nanoparticles for toluene photooxidation in the gas phase, *Catalysis Today*, 230: 104-111.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cattod.2013.11.044>
- [11] Pozan, G.S. and Ayca Kambur(2013), Removal of 4-chlorophenol from wastewater: Preparation, Characterization and photocatalytic activity of alkaline earth oxide doped TiO₂, *Applied Catalysis B: Environmental*, 129: 409-415.
- [12] Kim, Jeonghyun, Pengyi Zhang, Jinge Li, Jinlong Wang, and Pngfeng Fu(2014), Photocatalytic degradation of gaseous toluene and ozone under UV_{254-185 nm} irradiation using a Pd-deposited TiO₂ film, *Chemical Engineering Journal*, 252: 337-345.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2014.05.015>
- [13] Sano, T., N. Negishi, K. Uchino, J. Tanaka, S. Matsuzawa, and K. Takeuchi(2003), Photocatalytic degradation of gaseous acetaldehyde on TiO₂ with photodeposited metals and metal oxides, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 160: 93-98.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S1010-6030\(03\)00226-0](http://dx.doi.org/10.1016/S1010-6030(03)00226-0)

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)

[정회원]



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

<관심분야>
흡착, 유동층반응