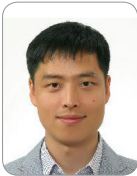


# 수질오염물질 처리를 위한 광촉매 기술 동향



이창구  
아주대학교  
/ 부교수  
changgu@ajou.ac.kr

## 1. 서언

화석연료의 과잉 소비는 전통적인 에너지 자원의 고갈과 함께 물, 토양 및 대기 환경의 오염을 가져왔다. 이러한 에너지 위기와 환경 오염을 해결하기 위해 재생 가능 및 녹색 에너지가 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 이 중 태양 에너지는 매우 매력적인 자연 에너지원이다. 매년 지구 표면에 닿는 태양 에너지의 양( $1.3 \times 10^5$  TW)이 인간이 소비하는 것(2010년  $1.6 \times 10^1$  TW)보다 훨씬 많다는 점을 고려한다면, 화학 반응을 통해 태양 에너지를 화학에너지로 전환하는 것은 재생 가능 에너지를 생산하는 유망한 방법이 될 수 있다 [1]. 이러한 측면에서 반도체 광촉매 기술은 현재와 미래의 글로벌 에너지 및 환경문제를 모두 해결할 수 있는 유망하고 실용적인 솔루션으로 주목받고 있다. 반도체 광촉매는 일반적으로 지구 어디에서나 풍부한 태양 에너지를 수확함으로써 (1) 물의 광촉매적 분해를 통한 수소( $H_2$ )의 생산, (2) 이산화탄소( $CO_2$ )의 변환 및 광환원, (3) 유기 오염 물질의 광촉매적 광분해 등과 같은 분야에서 중요한 기여를 할 것으로 기대된다 [2]. 이 중에서도 수중 오염물질처리를 위한 광촉매 적용 기술의 동향에 대하여 중점적으로 논의하고자 한다.

## 2. 수질오염물질 처리를 위한 광촉매 기술 동향

1972년 Fujishima와 Honda에 의해 이산화티타늄( $TiO_2$ )의 광전해 물 분해에 대한 첫 번째 보고 이후 광촉매 기술은 지난 수십 년 동안 수질 오염 물질 분해에 효과적인 기술로 인식되어왔다 [3,4]. 특히, 광촉매적 고급

산화 공정(Potocatalytic Advanced Oxidation Processes, PAOPs)은 기존의 AOP와 달리 수질 오염 물질을 파괴하기 위해  $O_3$  및  $H_2O_2$ 와 같은 전구체 화학적 산화제가 필요하지 않기 때문에 환경친화적인 수처리 기술로 간주된다. 뿐만 아니라, 광촉매 기술은 유기 분자의 광촉매 산화와 함께 물에서 금속 화합물의 광촉매 환원 제거에도 적용될 수 있다. 광촉매용 반도체 중에서  $TiO_2$ 는 고효율, 저비용, 기계적 견고성, 화학적 안정성, 비부식성 특성 때문에 가장 널리 사용되어왔다. 그러나 자외선(UV) 영역( $\lambda < 366 \text{ nm}$ )에서만 광활성인 광대역 밴드갭 에너지(3.2 eV)와 상대적으로 높은 전자( $e^-$ )-정공( $h^+$ ) 쌍의 재결합은  $TiO_2$ 의 광촉매 활성과 이들의 적용을 제한하고 있다 [5,6].

결국 재생 에너지 생산을 위해 태양 에너지를 화학 에너지로 전환하거나 수중 오염 물질을 효과적으로 분해하는 것은 모두 반도체 광촉매의 성능에 좌우된다. 반도체 광촉매와 관련된 주요 문제 중 하나는 불충분한 빛 이용률이다. 반도체에서 밴드 에지(CB 및 VB)의 위치는 산화환원 반응에 필요한 전위를 충족해야 한다. 이것은 흡수 개시보다 낮은 에너지를 가진 빛(가시광선 등)은 사용될 수 없음을 의미한다. 또한, 반도체 광촉매는 광 생성된 전하 캐리어의 비효율적인 분리로 인해 광활성 및 양자 효율이 저하된다. 이러한 문제를 극복하기 위한 전략으로는 광 이용률을 향상시키기 위해 광 흡수 능력이 우수한 반도체 광촉매 개발하거나, 광 생성된  $e^-$ - $h^+$  쌍의 분리를 효과적으로 촉진하기 위한 시스템을 구성하는 것이다 [1,2]. 이를 위해 (1) 이종원소의 도핑, (2) 결합 생성, (3) 이종 공촉매의 로딩, (4) 이종 구조의 구성, (5) 등방성 면의 제조, 그리고 (6) 다성분을 사용한 시너지 효과 생성 등의 다양한 연구들이 진행되어왔다 [7,8].

이처럼 수중 오염물질처리를 위한 PAOPs 공정은 지난 30년 동안 광범위한 연구의 대상이 되어왔으며 수많은 과학적 논문을 생성했다. 이러한 연구들의 궁극적인 목표가 도시 하수처리 작업에 광촉매를 적용하는 것임에도 불구하고, 대부분 연구들은 기술 이전 문제를 무시하고 학문적 옹호와 산업적 응용 사이의 격차를 벌려왔다. 실험대 규모의 새로운 재료 개발에 초점을 맞춘 연구들에서 많은 실제적인 문제가 간과되었다. 이들은 깨지기 쉽고 화학적으로 불안정하거나 값비싸거나 희귀하거나 본질적으로 독성이 있는 성분을 가진 비실용적인 물질의 확산을 가져왔다. 이에 따라 최근 광촉매 수처리 연구에 대한 비판적 문헌들이 지속해서 보고되고 있다 [9,10]. 따라서 향후 광촉매 재료 연구를 수행함에 있어서  $TiO_2$ 가 아직 차세대 재료로 대체되지 않은 이유를 면밀히 검토하는 것이 필요하다.

그럼에도 불구하고 다른 AOP 공정들에 비해 PAOPs의 고유한 이점을 재평가하려면 이들이 활용될 수 있는 틈새시장을 공략하는 것이 필요하다. 예를 들어, 광촉매는 산화뿐만 아니라 환원도 가능하게 하여 질산염이나 크롬산염과 같은 산화음이온을 환원적으로 제거에 적용될 수 있다. 이 과정에서 풍부하고 효율적인  $h^+$  스캐빈저의 존재는 오염물질의 환원적 제거를 유리하게 만들 수 있다 [11]. 한편,  $C_3N_4$ 와 같은 선택적인 광촉매에 의해  $H_2O_2$ 를 형성하기 위해 산소를 환원시키는 능력은 현장에서 AOP 전구체를 생산하는 유용한 접근법이 될 수 있다 [8]. 또한 고도로 산화적인  $h^+$ 의 생성은 다루기 힘든 유기물의 분해와 광물화에 기여할 수 있다. 특히 리그닌(펄프 및 제지 산업), 염료(섬유 산업), 폴리/퍼플루오로알킬 물질(화학 산업), 및 살충제(제약 산업)가 함유된 도전적 폐수의 완전한 광물화가 아닌 유해 물질

의 독성을 줄이는 전처리 기술로써 적용될 수 있다 [10]. 이때 유해 오염 물질의 불완전한 분해로 인해 부산물의 생태 독성 또는 인체 독성에 대한 신중한 평가가 필요하다. 가장 크게 옹호될 수 있는 속성은 광촉매가 태양열로 구동될 수 있어 매우 비용에 민감하거나 에너지 제한적인 응용 분야에 이상적이라는 것이다 [12]. 깨끗한 물에 접근할 수 없는 일부 지역들은 종종 에너지 인프라가 부족하여 태양열 기반 수처리 시스템 도입의 필요성을 정당화할 수 있다. 따라서 향후 이러한 틈새 시장을 구축하기 위한 수중 오염물질처리를 위한 광촉매 기술 개발 연구들이 활발히 수행될 필요가 있다.

## 참고문헌

1. Chen, X., Zhao, J., Li, G., Zhang, D., & Li, H. (2022). Recent advances in photocatalytic renewable energy production. *Energy Mater*, 2(10).
2. Zhao, Y., Jia, X., Waterhouse, G. I., Wu, L. Z., Tung, C. H., O'Hare, D., & Zhang, T. (2016). Layered double hydroxide nanostructured photocatalysts for renewable energy production. *Advanced Energy Materials*, 6(6), 1501974.
3. Fujishima, A., & Honda, K. (1972). Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode. *nature*, 238(5358), 37–38.
4. Lee, Y. J., Lee, C. G., Kang, J. K., Park, S. J., & Alvarez, P. J. (2021). Simple preparation method for Styrofoam? TiO<sub>2</sub> composites and their photocatalytic application for dye oxidation and Cr (vi) reduction in industrial wastewater. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 7(1), 222–230.
5. Lee, C. G., Javed, H., Zhang, D., Kim, J. H., Westerhoff, P., Li, Q., & Alvarez, P. J. (2018). Porous electrospun fibers embedding TiO<sub>2</sub> for adsorption and photocatalytic degradation of water pollutants. *Environmental science & technology*, 52(7), 4285–4293.
6. Lee, Y. J., Lee, H. S., Lee, C. G., Park, S. J., Lee, J., Jung, S., & Shin, G. A. (2020). Application of PANI/TiO<sub>2</sub> composite for photocatalytic degradation of contaminants from aqueous solution. *Applied Sciences*, 10(19), 6710.
7. Lee, Y. J., Kang, J. K., Park, S. J., Lee, C. G., Moon, J. K., & Alvarez, P. J. (2020). Photocatalytic degradation of neonicotinoid insecticides using sulfate-doped Ag<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> with enhanced visible light activity. *Chemical Engineering Journal*, 402, 126183.
8. Lee, Y. J., Jeong, Y. J., Cho, I. S., Park, S. J., Lee, C. G., & Alvarez, P. J. (2023). Facile synthesis of N vacancy g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> using Mg-induced defect on the amine groups for enhanced photocatalytic? OH generation. *Journal of Hazardous Materials*, 449, 131046.
9. Cates, E. L. (2017). Photocatalytic water treatment: so where are we going with this?.
10. Loeb, S. K., Alvarez, P. J., Brame, J. A., Cates, E. L., Choi, W., Crittenden, J., ... & Kim, J. H. (2018). The technology horizon for photocatalytic water treatment: sunrise or sunset?.
11. Lee, Y. J., Son, C. Y., Lee, C. G., Jeong, Y. J., Cho, I. S., Park, S. J., & Lee, J. (2023).

Enhancement of photocatalytic Cr (VI) reduction using mandarin peel extract as natural sacrificing agent. *Alexandria Engineering Journal*, 75, 151–163.

12. Loeb, S., Hofmann, R., & Kim, J. H. (2016). Beyond the pipeline: assessing the efficiency limits of advanced technologies for solar water disinfection. *Environmental Science & Technology Letters*, 3(3), 73–80.