

h-MoO₃ 나노막대를 이용한 메틸렌 블루 용액의 효과적인 광분해 조건 연구

강혜주, 김기철*
목원대학교 지능정보융합학과

Study on the Effective Photo-degradation of Methylene Blue Solution Using h-MoO₃ Nanorods

Hye-Ju Kang, Ki-Chul Kim*
Department of Intelligent Information Convergence, Mokwon University

요약 인구의 증가, 도시화 및 산업의 발전으로 폐수의 배출량이 증가하고 있고, 갑작스런 사고와 무단 방류 등으로 폐수의 유입량이 급격히 증가했을 경우, 오염물질을 효과적으로 제거하는 기술의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 자외선과 가시광선 영역에서 우수한 광촉매 특성을 나타내는 h-MoO₃ 나노막대를 초음파 분산과 화학적 침전법으로 합성하였다. 또한 광촉매의 농도와 광분해 온도, 가시광선과 자외선 등의 광원의 변화에 따른 methylene blue(MB) 용액의 효과적인 광분해 조건에 대하여 조사하였다. 그 결과 h-MoO₃는 가시광선 및 자외선 영역에서 MB 용액을 효과적으로 광분해하는 광촉매로 작용하였다. 특히 h-MoO₃의 농도가 1.5 mg/mL, 2.5 mg/mL, 3.5 mg/mL로 증가할수록 가시광선을 1시간 조사했을 때, MB 용액이 광분해 되는 정도는 각각 28%, 31%, 73%로 증가하였다. 또한 광촉매의 농도가 0.5 mg/mL로 낮게 분산된 MB 용액을 상온과 50 °C로 변화시키면서 자외선을 1시간 조사하였을 경우, MB 용액의 광분해 효율이 상온에서 4%, 50 °C에서 89%로 급격하게 증가하였다. MB 용액의 효과적인 광분해 조건을 적용하면, 갑자기 다량의 오염수가 유입되는 환경에서 광촉매의 농도를 조절하거나 광분해 온도를 조절하여 광분해 효율을 제어할 수 있으므로 폐수처리장에서 하천의 수질을 효과적으로 관리할 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract Wastewater discharge is increasing due to population growth, urbanization, and industrial development. Therefore, it is necessary to develop a technology to effectively remove pollutants when wastewater inflow increases rapidly due to sudden accidents or unauthorized discharge. In this study, h-MoO₃ nanorods with excellent photocatalytic properties in the ultra violet(UV) and visible light range were synthesized using ultrasonic dispersion and chemical precipitation method. The effective photodegradation (PD) conditions of a methylene blue(MB) solution were investigated for different photocatalyst concentrations, PD temperatures, and light sources, such as visible and UV light. h-MoO₃ effectively operated as a photocatalyst in a MB solution in visible and UV light. In particular, as the h-MoO₃ concentration was increased to 1.5 mg/mL, 2.5 mg/mL, and 3.5 mg/mL, the degree of PD of MB solution increased to 28%, 31%, and 73%, respectively, under visible light irradiation for 1 h. In addition, when a MB solution with a photocatalyst concentration as low as 0.5 mg/mL was irradiated with UV light for 1 h while changing the temperature from room temperature(RT) to 50 °C, the PD efficiency of the MB solution increased rapidly to 4% at RT and 89% at 50 °C. The PD efficiency in the MB solution could be controlled by adjusting the photocatalyst concentration or the PD temperature in an environment where a large amount of wastewater suddenly flows in. Hence, the water quality of a river can be effectively managed at wastewater treatment plants.

Keywords : h-MoO₃, Methylene Blue, Photocatalyst, Photodegradation, Wastewater

*Corresponding Author : Ki-Chul Kim(Mokwon University)

email: kckim30@mowkon.ac.kr

Received April 8, 2024

Revised May 10, 2024

Accepted June 7, 2024

Published June 30, 2024

1. 서론

인구의 증가와 도시화 및 산업이 빠르게 발전하면서 폐수 배출량이 2012년도부터 매년 증가하고 있다[1]. 2022년을 기준으로 우리나라의 경우 10년 전인 2011년과 비교해보면, 총인구수는 101만명(2.0%), 공공하수처리 인구는 489만명(11%)이 증가하였다. 인구수의 증가와 도시화로 인하여 매년 생활 하수처리율이 꾸준히 증가하는 추세를 보인다. 산업폐수의 경우 2022년도 기준 배출업소는 약 5만 6,403곳, 1일 폐수 발생량은 약 500.6만톤, 1일 폐수 방류량은 약 384.9만 톤으로 조사되었다. 산업 폐수 역시 10년 전과 비교하면, 배출업소는 약 7,229곳(14.7%)이 증가했고, 1일 폐수 방류량은 약 33.4만 톤(9.5%) 증가했다[2]. 하천의 수질오염은 생활 폐수 및 산업폐수로 인하여 대부분 발생하지만, 갑작스럽게 발생하는 사고[3]와 무단 방류 등에 의한 발생도 있다. 실제로 농공단지의 공장에서 정화시설을 거치지 않고 흘러나온 유독 물질로 인한 사고와 폐식용유의 무단 방류, 낙동강 폐놀 유출 등의 독성 화학물질로 인해 하천의 물고기가 집단 폐사하는 일이 있었다[4]. 섬유산업에서 섬유염의 제조과정 중 배출되는 methylene blue (이하 MB) 염료와 같은 화학물질은 독성이 있으면서 자연적으로 분해되지 않는 화학물질이므로 하천으로 유출되면, 수생 생물과 인간에게 심각한 피해를 주기 때문에 폐수 중에 포함된 MB 염료 등은 제거되어야 한다[5]. 수질오염이 인간에게 미치는 영향은 수인성 질병과 같은 다양한 건강문제를 발병시킬 수 있다. 폐수는 수생 생물에게 해를 끼치고 서식지를 파괴해 생태계의 균형을 방해할 수 있으므로 폐수 정화과정을 통해 오염물질을 제거하는 것이 필요하다. 이러한 시대적 상황에 따라 최근 5년간 폐수처리 또는 폐기물 관리 및 기후변화 완화와 관련된 기술에 대한 특허출원이 연평균 32.5%의 높은 증가율을 나타내고 있으며[6], 많은 양의 폐수를 효과적으로 처리하는 기술의 개발이 필요하다.

유기오염물질을 제거하는 기술 중 광촉매를 이용하는 기술은 폐수 속에 광촉매 물질을 첨가한 후 광원을 조사하는 간단한 방법으로 유기오염 물질을 물과 탄산가스로 분해하여 제거한다. 광촉매로 활용되는 대표적인 물질은 이산화티탄(TiO_2) 나노입자이다. TiO_2 나노입자는 화학적으로 안정하고 환경 친화적이라는 특징을 가지고 있다. 특히 TiO_2 는 아나타제(anatase), 루틸(rutile), 브루카이트(brookite) 세 가지의 결정상을 가지고 있다 [7-10]. 결정상에 따라 광촉매 특성이 다르며, 그 중에서

밴드갭 에너지(band gap energy)가 가장 넓어 산화환원 능력이 우수한 anatase- TiO_2 를 광촉매로 주로 사용한다[7,9]. TiO_2 의 광학적 밴드갭 에너지는 3.0-3.2 eV로 400 nm보다 낮은 파장의 자외선을 조사하면 광분해 반응이 활성화되어 오염물질을 분해한다[9,10].

태양으로부터 지구로 입사하는 태양광은 다양한 파장의 전자기파를 포함하고 있지만, 오존층에서 짧은 파장의 UV(ultra violet) C등이 차단되어 실제로 지구표면에 도달하는 태양광에서 자외선이 차지하는 비중은 약 8% 정도이다[11]. 따라서 TiO_2 광촉매를 사용하여 태양광으로 오염물질의 광분해를 진행한다면 광분해 효율이 제한적일 수 있다[11,12]. 지구 표면에 도달하는 태양광은 53%의 적외선과 39%의 가시광선으로 구성되어 있기 때문에[11] 가시광선 영역에서도 광분해가 가능한 광촉매를 사용하여 오염물질을 광분해한다면, 광분해 효율이 증가할 것이다. 따라서 본 연구에서는 가시광선 영역에서도 광분해가 가능한 물질인 삼산화몰리브덴(MoO_3)을 화학적 침전법으로 합성하고 MB 용액의 효과적인 광분해 조건에 대하여 연구하였다.

MoO_3 의 광학적 밴드갭 에너지는 2.8 ~ 3.6 eV로 넓기 때문에 가시광선과 자외선 영역에서 광분해 반응이 일어난다. 또한 MoO_3 는 열역학적으로 안정한 사방정계(orthorhombic) 결정상의 α - MoO_3 와 준안정적인(meta-stable) 단사정계(monoclinic) 결정상의 β - MoO_3 , 육방정계(hexagonal) 결정상의 h- MoO_3 등, 세 가지 결정상을 가지고 있다. 그 중에서 1차원의 터널 구조를 갖고 있는 육방정계 결정상의 h- MoO_3 는 α 상과 β 상과 비교하여 광학적 특성이 우수하기 때문에[13] h- MoO_3 의 광촉매 효율에 대한 선행 연구들이 보고되었다. 하지만 대부분의 선행연구들은 광촉매 물질에 조사하는 광원의 세기가 가시광선 램프의 경우 30 watt[5], 50 watt[13,14], 300 watt[15], 500 watt[16]이며, 자외선 램프의 세기는 15 watt[5], 125 watt[17]와 같이 높은 전력의 램프를 사용하여 h- MoO_3 의 광분해 효율을 평가하였다. 하지만 본 연구에서는 5 watt의 가시광선 램프와 6 watt의 자외선 램프를 사용하여 낮은 전력에서도 h- MoO_3 nanorods가 MB 용액을 효과적으로 광분해하는 것을 확인하였다. 특히 h- MoO_3 광촉매의 농도 및 광분해 온도, 광촉매 물질에 조사되는 광원의 종류 등을 변수로 설정하여 광분해 실험을 진행함으로써 h- MoO_3 nanorods를 이용한 MB 용액의 효과적인 광분해 조건에 대하여 연구하였다.

2. 실험방법

흠집 없는 h-MoO₃ nanorods를 합성하기 위하여 초음파 분산기를 사용하여 전구체를 균일하게 용해시킨 후 화학적 침전법으로 합성하였다[18]. h-MoO₃ nanorods의 합성에는 ammonium heptamolybdate(이하 AHM)와 질산(HNO₃, 60%), 탈이온수(DI water), 에탄올을 사용하였다. 합성과정은 DI water 10 mL에 MoO₃ 전구체인 AHM 2.47 g을 넣고 초음파 분산기를 이용하여 균일하게 용해시킨 다음[18], 95 °C로 예열된 oil bath에 분산된 용액을 넣고 15분간 전구체가 용해된 용액의 온도를 oil bath의 온도와 동일하게 맞춘 다음, 촉매제인 질산 5 mL를 방울방울 첨가하여, 1시간 동안 h-MoO₃ nanorods를 성장시켰다. 성장이 끝난 용액을 실온으로 식힌(cooling) 후, 원심분리기를 사용하여 에탄올로 세척한 다음 DI water로 세척하고, 60 °C 진공 오븐에서 12시간동안 건조시켜 h-MoO₃ nanorods를 수득하였다.

h-MoO₃ nanorods의 MB 용액 광분해 특성을 평가하기 위하여, 우선 methylene blue trihydrate 10 mg을 DI water 500 mL에 넣고 실온에서 30분 동안 300 rpm으로 교반하여 20 ppm의 MB 용액을 제조하였다. MB 용액의 광분해 특성은 광촉매 물질인 h-MoO₃ nanorods 파우더를 각각 다른 농도로 첨가하고 가시광선 및 자외선 램프를 조사하여 MB 용액이 분해되는 정도를 UV-visible spectrometer로 흡광도를 측정하여 평가하였다. MB 용액의 광분해 실험에 사용된 광원은 가시광선의 경우 5 watt의 할로겐 램프와 자외선의 경우 6 watt의 파장 365 nm를 갖는 자외선 램프를 사용하였다.

MB 용액의 광분해 실험은 세 가지 조건으로 진행하였다. 첫째, 가시광선 조사 시 h-MoO₃ nanorods 광촉매의 농도(1.5 mg/mL, 2.5 mg/mL, 3.5 mg/mL)가 광분해 효율에 미치는 영향을 조사하였다. 둘째, 가시광선과 자외선 조사 시 MB 용액의 온도가 광분해에 미치는 영향을 상온(RT, 27 °C)과 50 °C에서 각각 조사하였다. 마지막으로 h-MoO₃ nanorods 광촉매의 농도를 동일하게 유지하면서 상온에서 가시광선과 자외선을 조사하여 광원에 따른 MB 용액 광분해 특성의 차이를 평가하였다.

MB 용액의 광분해 실험은 50 mL의 MB 용액에 h-MoO₃ nanorods 파우더를 각각 다른 농도로 첨가한

다음 암흑 조건에서 30분간 교반하여 광촉매 물질이 균일하게 분산되도록 하였다. 이후 가시광선 또는 자외선을 조사하여 광분해를 진행하였다. MB 용액의 광분해 정도는 광원조사 후 30분마다 3 mL의 시료를 채취하여 원심분리를 진행하고, 상등액만 분리하여 quartz cell에 넣은 다음, 흡광도를 측정하였다. MB 용액의 광분해 실험은 모두 암흑조건에서 진행하여 조사한 가시광선 및 자외선 이외에는 MB 용액의 광분해 실험에 영향을 미치지 않도록 주의하여 실험을 진행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

초음파 분산 및 화학적 침전법으로 합성된 h-MoO₃ nanorods의 합성된 모양을 전계 방출형 주사전자현미경(FE-SEM)으로 분석하였고, 그 결과를 Fig. 1에 나타내었다. 흠집 없는 육각형 모양의 1D hexagonal nano-rods가 잘 합성된 것을 확인할 수 있다.

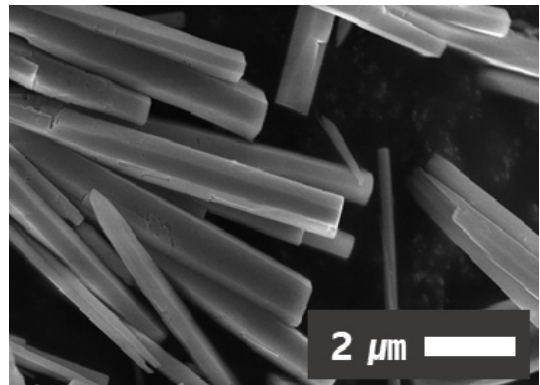


Fig. 1. FE-SEM image of the synthesized h-MoO₃ nanorods (Magnification is 25,000 x)

합성된 h-MoO₃의 결정학적 특성을 분석하기 위하여 X선 회절분석법(X-Ray Diffraction, 이하 XRD, 파장: Cu Kα1 = 1.5406 Å, 전압: 45 kV, 전류: 200 mA)으로 분석하였고, 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다. h-MoO₃ 결정상의 기준 데이터(ICDD card No, 03-065-0033)와 XRD 회절 패턴이 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 FE-SEM 및 XRD 분석 결과로부터 본 연구에서 합성된 시료는 흠집 없는 hexagonal 결정상의 h-MoO₃ nanorods가 잘 합성된 것을 확인할 수 있다.

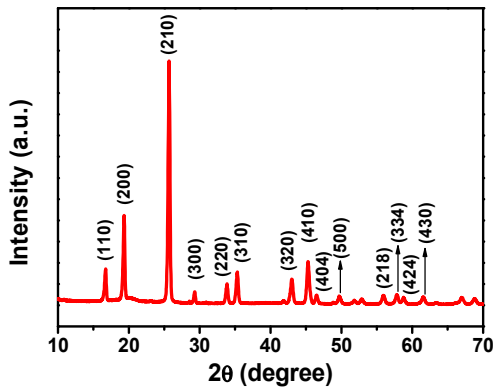


Fig. 2. XRD pattern of the synthesized h-MoO₃ nanorods

합성된 h-MoO₃ nanorods의 광학적 밴드갭 에너지를 계산하기 위하여 DI water 20 mL에 h-MoO₃ nanorods 파우더 10 mg을 분산하여(농도는 0.5 mg/mL) UV-visible spectrophotometer로 흡광도를 측정하였고, 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. h-MoO₃ nanorods의 광학적 밴드갭 에너지는 Tauc Plot를 사용하여 계산하였고[5], Fig. 3에 삽입된 그래프로 나타내었다. h-MoO₃의 광학적 밴드갭 에너지는 3.63 eV로 계산되었다.

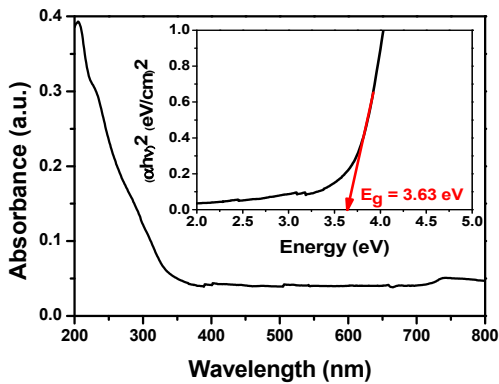


Fig. 3. Absorbance of h-MoO₃ nanorods. Inset is the optical band gap energy of h-MoO₃ nanorods calculated from Tauc plot[5]

광촉매 h-MoO₃ nanorods를 이용한 MB 용액의 광분해 실험에서 분해되지 않은 MB 용액의 백분율(%)은 흡광도 곡선의 최대값의 변화로부터 Eq. (1)을 이용하여 계산하였다[14].

$$\frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

Where, C_0 denotes initial concentration of MB solution, C_t is residual concentration of MB solution measured per 30 minutes

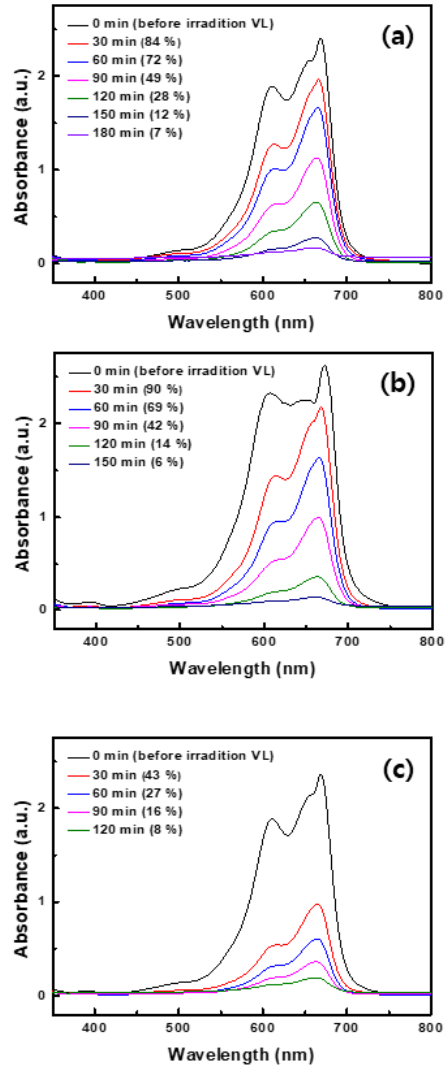


Fig. 4. Photo-degradation effect of h-MoO₃ nanorods photocatalyst for different concentration (a) 1.5 mg/mL, (b) 2.5 mg/mL, (c) 3.5 mg/mL (measured at 23 °C, under visible light irradiation)

20 ppm의 MB 용액에 각각 다른 농도로 광촉매 h-MoO₃ nanorods 파우더를 분산시킨 후 실온(23 °C)에서 가시광선을 조사하면서 광분해 실험을 진행한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 실험 결과 광촉매 농도가 1.5

mg/mL일 때에는 120분이 경과 후에 MB의 72%가 분해되었고, 2.5 mg/mL 농도에서는 120분 후에 86%, 3.5 mg/mL 농도에서는 120분 후에 92%의 MB가 분해되었다. 이 실험을 통하여 광촉매 농도가 증가할수록 MB 용액의 광분해 효율이 증가한다는 것을 확인할 수 있다. 이것은 광분해에 참여하는 촉매의 양이 많아질수록 빛에 의한 표면활성 부위가 증가하여 광분해 효율이 증가하는 것이다[13].

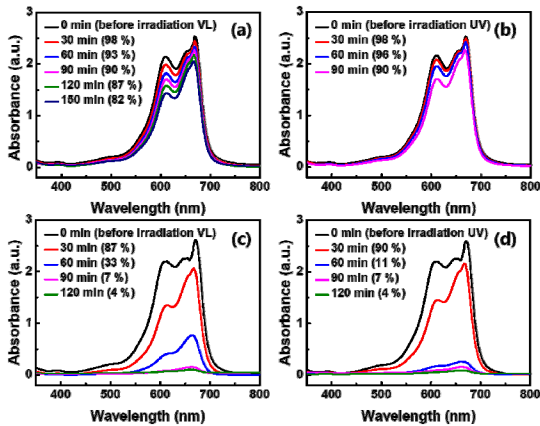


Fig. 5. Photo-degradation effect of h-MoO₃ nanorods for different operating temperature and light source (a) RT and visible light irradiation, (b) RT and UV rays irradiation, (c) 50 °C and visible light irradiation (d) 50 °C and UV rays irradiation with 0.5 mg/mL concentration

광촉매 h-MoO₃ nanorods 파우더를 소량만 첨가하여 광원과 MB 용액의 온도 변화가 MB 용액의 광분해에 미치는 영향을 확인한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. h-MoO₃ 광촉매의 농도를 0.5 mg/mL로 고정했으며, 조사하는 광원은 가시광선 램프와 자외선 램프를 각각 사용하였다. oil bath를 이용하여 일정한 온도 즉, 상온(RT, 27 °C)에서 가시광선을 조사했을 때와 자외선을 조사했을 때의 광분해 특성을 Fig. 5 (a), (b)에서 비교하였고, 50 °C에서 가시광선을 조사했을 때와 자외선을 조사했을 때의 광분해 특성을 Fig. 5 (c), (d)에 나타내었다. 상온에서는 조사되는 광원에 따른 광분해 특성이 크게 차이 나지 않았다. 반면에 50 °C에서는 가시광선을 조사했을 때 보다 자외선을 조사했을 때 MB 용액의 분해가 더 빠르게 일어나는 것을 확인할 수 있다. 또한 광분해가 진행되는 온도의 효과는 다른 변수보다 매우 크게 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 50 °C에서 자외선을 조사하였을 경우, MB 용액의 89%가 60분 만에 분해되었다.

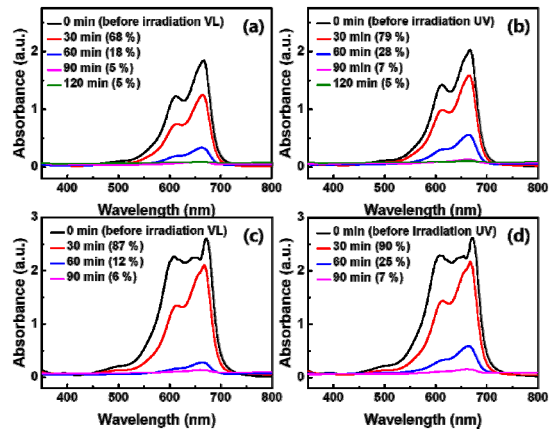


Fig. 6. Photo-degradation effect of h-MoO₃ nanorods for different catalyst concentration and light source. (a) 2.0 mg/mL and visible light irradiation, (b) 2.0 mg/mL and UV rays irradiation, (c) 2.5 mg/mL and visible light irradiation, (d) 2.5 mg/mL and UV rays irradiation operating at RT

마지막으로 상온에서 광원의 종류에 따른 MB 용액의 광분해 특성 변화를 조사하여 Fig. 6에 나타내었다. h-MoO₃ 광촉매의 농도를 2.0 mg/mL로 고정한 다음 가시광선을 조사했을 때의 광분해 특성과 자외선을 조사했을 때의 광분해 특성을 Fig. 6 (a), (b)에 나타내었고, h-MoO₃ 광촉매의 농도를 2.5 mg/mL로 고정한 다음 가시광선을 조사했을 때의 광분해 특성과 자외선을 조사했을 때의 광분해 특성을 Fig. 6 (c), (d)에 각각 나타내었다. h-MoO₃ 광촉매의 농도에 따라서 조금씩 차이가 있지만 자외선을 조사했을 경우보다 가시광선을 조사했을 경우에 MB 용액의 광분해 속도가 조금 빠른 것을 확인할 수 있다. 특히 h-MoO₃ 광촉매의 농도가 2.5 mg/mL로 증가하면 그 효과가 더욱 두드러져서 가시광선을 조사하면 60분 만에 MB 용액의 88%가 분해되었다. 반면에 자외선을 조사할 경우에는 60분 만에 MB 용액의 75%가 분해되었다. 즉 동일한 h-MoO₃ 광촉매의 농도에서 전체적인 MB 용액의 분해 속도는 비슷하나 가시광선을 조사했을 때가 자외선을 조사했을 때보다 광분해 효율이 좋았다.

4. 결론

본 연구에서는 초음파 분산기를 이용하여 화학적 침전 방법으로 가시광선 및 자외선 영역에서 광촉매로 사용할

수 있는 흡집 없는 h-MoO₃ nanorods를 합성하였고, MB 용액의 효과적인 광분해 조건을 연구하였다. 연구의 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

첫째, MB 용액에 분산시키는 광촉매 물질의 농도가 증가할수록 MB 용액의 광분해 효율이 증가하였다. 즉 광촉매의 농도가 1.5 mg/mL, 2.5 mg/mL, 3.5 mg/mL로 증가함에 따라 1시간 동안 가시광선을 조사했을 때, MB 용액이 광분해되는 정도는 각각 28%, 31%, 73%로 측정되었다.

둘째, 광촉매 물질을 소량만 첨가하여 광분해 과정이 천천히 진행되도록 0.5 mg/mL 농도로 조절한 상태에서 MB 용액의 온도를 상온과 50 °C로 제어하고 광분해 실험을 진행한 결과, 상온에서 가시광선을 1시간 동안 조사했을 때에는 MB 용액의 7%가 광분해되었고, 50 °C에서는 67%가 광분해 되었다. 반면에 상온에서 자외선을 1시간 동안 조사했을 때에는 MB 용액의 4%가 광분해되었고, 50 °C에서는 89%가 광분해되었다. 즉 상온에서는 조사되는 광원에 따른 차이가 미미하였지만 50 °C에서는 자외선이 조사될 때 MB 용액의 광분해가 더욱 활발하였다.

셋째, 광촉매의 농도를 변화시키면서 동일한 광촉매 농도에 대하여 상온에서 가시광선과 자외선을 조사하면서 MB 용액의 광분해 특성을 조사한 결과, 농도에 따라 미미하게 차이는 있지만 가시광선을 조사하였을 경우 MB 용액의 광분해 효율이 더 우수한 것으로 나타났다. 즉 광촉매의 농도가 2.5 mg/mL일 때, 1시간의 가시광선 조사에서는 MB 용액의 88%가 광분해되었고, 1시간의 자외선 조사에서는 MB 용액의 75%가 광분해되었다.

이상에서 분석한 결과들을 종합하면 h-MoO₃ nanorods는 가시광선 및 자외선 영역에서 MB 용액을 효과적으로 광분해하는 광촉매로 작용하였다. 태양광이 조사되는 환경에서 h-MoO₃ nanorods를 광촉매로 적용하면 오염수를 효과적으로 광분해 할 것으로 기대된다. 또한 갑자기 다량의 오염수가 유입되는 상황이 발생했을 때, 광촉매의 농도를 조절하거나, 광분해 온도를 조절하면 광분해 효율을 유연하게 조절할 수 있으므로 오염수를 효과적으로 정화시킬 수 있고, 폐수처리장에서 하천의 수질을 효과적으로 관리할 수 있을 것으로 기대된다.

References

[1] Statistics KOREA [Internet]. Wastewater discharge facilities and discharge status [cited 2023 March 31],

Available From:

https://www.index.go.kr/unity/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=1474 (accessed March. 05, 2024)

- [2] N. J. Joe, Sewage treatment rates, wastewater discharge businesses, etc. continue to increase, *EnergyDaily*, c2023 [cited 2023 February 22], Available From: <https://www.energydaily.co.kr/news/articleView.html?idxno=134898> (accessed March. 07, 2024)
- [3] M. S. Ku, Ministry of Environment "Normalization of Water Pollution Gwan-ri Stream... Starts Discharge in Full-scale", *NEWIS*, c2024 [cited 2024 February 14], Available From: https://www.newsis.com/view/?id=NISX20240205_0002617513&clID=10206&pID=10200 (accessed March. 05, 2024)
- [4] D. H. Lee, [Lee Deok-hwan's Science World] Water pollution and fish mass death, *Dongascience*, c2022 [cited 2022 June 22], Available From: <https://m.dongascience.com/news.php?idx=54984> (accessed March. 05, 2024)
- [5] A. L. Al-alotaibi, N. Altamimi, E. Howsawi, K. A. Elsayed, I. Massoudi, A. E. Ramadan, "Synthesis and Characterization of MoO₃ for Photocatalytic Applications", *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, Vol.31, pp.2017-2029, Feb. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10904-021-01939-w>
- [6] J. G. Yang, Climate mitigation technology patent weight doubles over 20 years, *SkyeDaily*, c2024 [cited 2024 February 31], Available From: https://www.skyedaily.com/news/news_view.html?ID=221349 (accessed March. 05, 2024)
- [7] Q. Cuo, C. Zhou, Z. Ma, X. Yang, "Fundamentals of TiO₂ Photocatalysis: Concepts, Mechanisms, and Challenges", *Advanced Materials*, Vol.31, pp.1901997, August 2019. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201901997>
- [8] J. Schneider, M. Matsuoka, M. Takeuchi, J. Zhang, Y. Horiuchi, M. Anpo, D. W. Bahnemann, "Understanding TiO₂ Photocatalysis: Mechanisms and Materials", *Chemical Reviews*, Vol.114, pp.9919-9986, September 2014. DOI: <https://doi.org/10.1021/cr5001892>
- [9] H. Eidsvåg, S. Bentouba, P. Vajeston, S. Yohi, D. Velauthapillai, "TiO₂ as a Photocatalyst for Water Splitting-An Experimental and Theoretical Review", *Molecules*, Vol.26, pp.1687, March 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules26061687>
- [10] S. Bibi, S. S. Shah, F. Muhammad, M. Siddiq, L. Kiran, S. A. Aldossari, M. S. S. Muhab, S. Sarwar, "Cu-doped mesoporous TiO₂ photocatalyst for efficient degradation of organic dye via visible light photocatalysis", *Chemosphere*, Vol.339, October 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139583>
- [11] American Chemical Society, *Chemistry in Context*, 10th Edition, p.454, Sciplus, 2021. pp.86-126
- [12] S. Y. Lee, S. J. Park, "TiO₂ photocatalyst for water

treatment applications”, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol.19, pp.1761-1769, November 2013.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2013.07.012>

- [13] A. Chithambararaj, N. S. Sanjini, S. Velmathi, A. C. Bose, "Preparation of h-MoO₃ and α-MoO₃ nanocrystals: comparative study on photocatalytic degradation of methylene blue under visible light irradiation", *Physical Chemistry Chemical Physics*, Vol.13, 15, pp.14761-14769, July 2013.
DOI: <https://doi.org/10.1039/C3CP51796A>
- [14] A. Chithambararaj, B. Winston, N. S. Sanjini, S. Velmathi, A. C. Bose, "Band Gap Tuning of h-MoO₃ Nanocrystals for Efficient Visible Light Photocatalytic Activity Against Methylene Blue Dye", *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, Vol.15, pp.4913-499, July 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1166/inn.2015.9846>
- [15] L. WANG, H. X. LI, Z. L. XUE, "Synthesis of h-MoO₃ nanorods and h/α-MoO₃ composites and their photocatalytic performance", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol.33, pp.2155-2167, July 2023.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(23\)66250-8](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(23)66250-8)
- [16] H. Hu, C. Deng, J. Xu, K. Zhang, M. Sun, "Metastable h-MoO₃ and stable α-MoO₃ microstructures: controllable synthesis, growth mechanism and their enhanced photocatalytic activity", *Journal of Experimental Nanoscience*, Vol.10, pp.1336-1346, January 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1080/17458080.2015.1012654>
- [17] T. V. Sviridova, L. Yu. Sadovskaya, E. M. Shchukina, A. S. Logvinovich, D. G. Shchukin, D. V. Sviridov, "Nanoengineered Tin-film TiO₂/h-MoO₃ Photocatalysts Capable to Accumulate Photoinduced Charge", *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, Vol.327, pp.44-50, August 2016.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jphotochem.2016.04.018>
- [18] S. H. Park, K. C. Kim, "A Facile Synthesis Method of Flaw-free h-MoO₃ Nanorods", *Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.23, pp.315-320, May 2022.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2022.23.5.315>

강혜주(Hye-Ju Kang)

[준회원]



- 2024년 2월 : 목원대학교 도시환경화학공학과 (공학사)
- 2024년 3월 ~ 현재 : 목원대학교 지능정보융합학과 (석사과정)

<관심분야>

에너지관련 소재, 기능성 소재, 그래핀 복합소재

김기출(Ki-Chul Kim)

[중신회원]



- 1903년 2월 : 아주대학교 물리학과 (이학사)
- 1996년 2월 : 아주대학교 물리학과 (이학석사)
- 2002년 2월 : 아주대학교 물리학과 (이학박사)
- 2002년 4월 ~ 2006년 3월 : 한국전자통신연구원 선임연구원
- 2008년 3월 ~ 현재 : 목원대학교 교수

<관심분야>

에너지 저장 소재, 가스센서, 나노 바이오 응용 소재