

# 가시광선 영역에서 광촉매 활성도가 강화되는 아나타제 TiO<sub>2</sub>@GO 나노복합체의 합성

김기출

목원대학교 식품제약학부

## Synthesis of Anatase TiO<sub>2</sub>@GO Nanocomposites Enhancing Photocatalytic Activity in Visible Light Range

Ki-Chul Kim

Division of Food and Pharmaceutical Technology, Mokwon University

**요약** 이산화티탄(TiO<sub>2</sub>: titanium dioxide, 이하 TiO<sub>2</sub>) 나노입자는 화학적으로 안정하고, 무독성이며, 높은 광활성도를 나타내는 저가의 소재이므로 광촉매로서 다양한 분야에 활용되고 있다. 특히 아나타제 TiO<sub>2</sub> 나노입자는 밴드갭 에너지가 3.2 eV로 자외선 영역에서 우수한 광촉매 특성을 나타낸다. 하지만 지상에 도달하는 태양광 중 자외선은 8%에 불과하므로 39%를 차지하는 가시광선 영역에서도 광촉매 활성도가 높은 TiO<sub>2</sub> 나노입자 기반의 광촉매 개발이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 그래핀 산화물과 아나타제 TiO<sub>2</sub> 나노입자를 졸-겔 공정과 수열처리 공정을 복합화하여 아나타제 TiO<sub>2</sub>@GO 나노복합체를 합성하였고, 가시광선 영역에서 광촉매 활성도를 조사하였다. 그 결과 아나타제 TiO<sub>2</sub> 나노입자는 2시간동안 8%의 메틸렌 블루 용액을 광분해한 반면, 아나타제 TiO<sub>2</sub>@GO 나노복합체는 30분동안 89%의 메틸렌 블루 용액을 광분해하는 우수한 광촉매 활성도를 나타내었다. 아나타제 TiO<sub>2</sub>@GO 나노복합체는 가시광선과 자외선 영역에서 높은 광촉매 활성도가 필요한 분야에 적용될 수 있을 것으로 전망된다.

**Abstract** Titanium dioxide(TiO<sub>2</sub>) nanoparticles are used widely as photocatalysts in various applications because of their unique chemical stability, nontoxicity, high photoactivity, and abundance. In particular, anatase TiO<sub>2</sub> nanoparticles exhibit superior photocatalytic performance in the ultraviolet (UV) range because of the 3.2 eV band gap. On the other hand, UV comprises only 8% of solar radiation on the earth's surface. Hence, there is a need to develop TiO<sub>2</sub> nanoparticle-based photocatalysts in the visible light range, which comprises 39% of solar radiation on the earth's surface. In this study, anatase TiO<sub>2</sub>@GO nanocomposites were synthesized using a hybridized sol-gel and hydrothermal process. The photocatalytic activity was investigated in the visible light range. Anatase TiO<sub>2</sub>@GO nanocomposites exhibited superior photocatalytic activity in the visible light range with 89% photo-degradation of a methylene blue solution within 30 minutes. By contrast, pure anatase TiO<sub>2</sub> nanoparticles exhibited only 8% photo-degradation methylene blue solution within two hours in the visible light range. TiO<sub>2</sub>@GO nanocomposites can be applied in fields requiring high photocatalytic activity in the visible light and UV ranges.

**Keywords** : Aantase Nanoparticles, Graphene Oxide, Nanocomposites, Photocatalytic Activity, Photo Catalyst

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

email: kckim30@mowkon.ac.kr

Received November 23, 2023

Accepted February 6, 2024

Revised December 20, 2023

Published February 29, 2024

## 1. 서론

1950년에 24억 명이었던 세계 인구는 급격하게 증가하여 2017년 76억 명을 돌파하였고 지속적으로 증가하고 있다[1]. 인구의 증가와 삶의 질 향상에 대한 요구가 증가함에 따라 에너지 수요도 지속적으로 증가하고 있다. 증가하는 에너지 수요는 대부분 화석연료의 소비증가로 충당되고 있으며[1], 화석연료의 소비증가는 지구 온실가스의 배출증가를 유발하고 있다. 인구의 증가와 더불어 도시화의 진행은 생활하수의 증가와 다양한 환경 오염의 문제를 유발시키고 있다. 따라서 지속가능한 사회를 위하여 인류는 에너지 문제 및 환경오염 문제를 해결해야만 하는 상황에 직면해 있다.

이산화티탄( $\text{TiO}_2$ : titanium dioxide, 이하  $\text{TiO}_2$ ) 나노입자는 화학적으로 안정하고, 무독성이며, 높은 광활성도(high photoreactivity), 내부식성, 저가 특성 때문에 주목받고 있는 광촉매 물질이다[2]. 따라서  $\text{TiO}_2$ 는 오염물질 분해의 광촉매, 염료감응형태양전지, 가스센서, 화장품 등 다양한 분야에 응용되고 있다[2-5].  $\text{TiO}_2$  나노입자는 열역학적으로 매우 안정한 루틸 결정상(rutile, tetragonal structure)과 열역학적으로 준안정적(metastable)인 아나타제 결정상(anatase, tetragonal structure) 및 브루카이트 결정상(brookite, orthorhombic structure) 등으로 존재하며 결정구조에 따라 서로 다른 특성을 나타낸다[2,3]. 일반적으로  $\text{TiO}_2$ 의 광촉매 활성도(photocatalytic activity)는 결정구조와 결정크기(crystallite size), 표면적, 기공구조(pore structure) 등에 영향을 받는다[2]. 루틸 결정상은 3.0 eV의 밴드갭(band gap) 에너지를 가지고 있어 3.2 eV의 밴드갭 에너지를 갖고 있는 아나타제 결정상보다 밴드갭 에너지가 작지만 빠른 전자-홀 재결합률(faster electron-hole recombination rate)과 보다 큰 결정립 크기(larger grain size), 보다 작은 비표면적(smaller specific surface area) 특성 등으로 인하여 광촉매 활성도는 아나타제 결정상보다 낮다. 따라서 아나타제 결정상의  $\text{TiO}_2$  나노입자는 우수한 광촉매 활성도로 인하여 다양한 분야에 활용되고 있다[2-5].

위에서 기술한 것처럼,  $\text{TiO}_2$  나노입자 기반의 광촉매는 오염물질의 분해, 유기염료태양전지, 물분해(water splitting)에 의한 수소생산 등 다양한 분야에 활용되고 있다[2-6]. 지속가능한 사회를 위해 인류가 해결해야 할 여러 당면 과제 중 가장 시급한 문제는 에너지와 환경문

제이다. 특히 화석연료의 고갈이 빠르게 진행됨에 따라 재생 가능한 친환경적인 에너지원의 개발이 그 무엇보다 중요한 문제로 부각되고 있다[7]. 이상적인 연료는 단위 질량당 많은 에너지를 공급할 수 있어야 하며, 연소의 부산물이 인체와 환경에 유해하지 않아야 한다. 또한 연료를 쉽게 생산할 수 있고, 저장과 수송이 용이하며 재생 가능해야 한다[8]. 하지만 이러한 이상적인 연료의 조건을 모두 갖추고 있는 연료는 존재하지 않는다. 화석연료 중 비교적 청정하고, 에너지 효율이 높은 메탄가스( $\text{CH}_4$ )는 단위질량당 50.1 kJ/g으로 많은 에너지를 공급할 수 있지만, 연소 과정 중에 지구 온실가스인 이산화탄소를 배출한다. 수소 가스( $\text{H}_2$ )는 단위질량당 249 kJ/g의 많은 에너지를 공급할 수 있고(메탄가스의 약 5배), 연소의 부산물이 물( $\text{H}_2\text{O}$ ) 뿐이어서 환경에 유해하지 않으며, 지구에 매우 풍부한 물을 전기분해하여 얻을 수 있는 장점이 있다[8]. 하지만 물에서 수소를 생산하기 위해서는 산소와 수소가 화학적으로 결합되어 있는 공유결합을 끊어내기 위해 충분한 에너지를 공급해야 한다.  $\text{TiO}_2$  나노입자는 물분해를 위한 광전기 화학 전지(photoelectrochemical cell)에 활용되고 있다[6]. 또한 유기염료 분해 등 환경오염 물질의 분해에 활용되고 있다. 하지만 광촉매 활성도가 높은 아나타제 결정상의  $\text{TiO}_2$  나노입자의 밴드갭 에너지는 3.2 eV로 비교적 높기 때문에 자외선 영역에서 활성화 된다[2,3].

태양으로부터 지구에 입사하는 태양광은 다양한 파장의 전자기파를 포함하고 있다. 하지만 높은 에너지를 가지고 있는 자외선(UV: Ultra Violet, 이하 UV)은 지상으로부터 약 25 km 상공에 존재하는 오존층( $\text{O}_3$ )에서 파장 200 nm ~ 280 nm 영역의 UVC를 모두 흡수하고, 파장 280 nm ~ 320 nm 영역의 UVB도 대부분 흡수하는 등의 과정을 거쳐, 지구 표면에 도달하는 태양광은 적외선(infrared) 53%, 가시광선(visible light) 39%, 자외선 8%로 구성되어 있다[9]. 따라서  $\text{TiO}_2$  나노입자 기반의 광촉매를 활용하여 유기 오염물질을 분해하거나 물분해에 의해 수소를 생산하기 위해서는 태양광에서 구성 비율이 높은 가시광선과 자외선 영역에서 모두 활성화되는 광촉매의 개발이 필요하다.

따라서 본 연구에서는  $\text{TiO}_2$  나노입자와 그래핀 옥사이드(GO: Graphene Oxide, 이하 GO)를 복합화하여 자외선 영역에서 뿐만 아니라 가시광선 영역에서도 광촉매 활성도가 높은  $\text{TiO}_2$ @GO 나노복합체(nanocomposites)를 합성하였고, 가시광선과 자외선 영역에서 광촉매 활성도에 대하여 조사하였다.

## 2. 실험방법

TiO<sub>2</sub> 나노입자의 광촉매 성능은 빛으로부터 생성된 전자-홀 쌍(photogenerated electron-hole pairs)의 빠른 재결합에 의해 제한된다[10,11]. 광촉매 성능을 향상시키기 위하여 TiO<sub>2</sub> 나노입자에서 빛으로부터 생성된 전자-홀 쌍의 재결합을 억제하는 다양한 방법이 연구되었는데, TiO<sub>2</sub> 나노입자와 ZnO, WO<sub>3</sub>와 같은 반도체물 질 또는 그래핀과 같은 탄소질의 소재(carbonaceous substance)로 이형접합 나노구조(heterojunction nanostructure)를 형성시키면 TiO<sub>2</sub> 나노입자에서의 전자-홀 쌍의 재결합을 감소시킬 수 있다[10,11]. 특히 그래핀은 우수한 전기전도도, 높은 이론적 비표면적, 플렉시블한 구조, 높은 투과도 등의 특성을 보유하고 있어, TiO<sub>2</sub> 나노입자 광촉매의 지지물질(support material)로 적합하다[10-12]. 그래핀 층에서 광 여기된 전자가 TiO<sub>2</sub> 나노입자로 전달되는 것이 TiO<sub>2</sub> 나노입자에서의 전하 재결합보다 빠르게 진행되기 때문에 광 여기된 전자-홀 쌍의 재결합이 지연된다. 특히 가시광선 영역에서 그래핀 층에서 광 여기된 전자가 TiO<sub>2</sub> 나노입자로 빠르게 수송되기 때문에 가시광선 영역에서도 TiO<sub>2</sub> 나노입자와 그래핀의 이형접합 구조에서는 높은 광촉매 활성도가 가능하다[10]. 따라서 본 연구에서는 Fig. 1에 나타난 것처럼 Hummer's 방법으로 합성된 그래핀 산화물(GO: Graphene Oxide, 이하 GO) 나노시트와 아나타제 상의 TiO<sub>2</sub> 나노입자를 복합화하여 아나타제 TiO<sub>2</sub>@GO 나

노복합체를 합성하였다.

GO를 Hummer's 방법으로 합성하기 위하여 graphite flake(Sigma Aldrich, 99% carbon, 100 mesh) 2g과 질산나트륨(Duksan, 99%, NaNO<sub>3</sub>) 2g, 그리고 황산(Samchun, 95.0%, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) 96 ml를 0 °C의 ice bath에서 혼합하고 10분간 교반하였다. 이후 과망간산칼륨(Samchun, 90%, KMnO<sub>4</sub>) 12g을 천천히 첨가하고 0 °C 조건에서 90분동안 300 rpm으로 교반시킨 다음, ice bath를 제거하고 35 °C의 water bath에서 2시간 동안 추가로 교반하였다. water bath를 제거한 후에 탈이온수(DI water, De-Ionized water, 이하 DI water) 80ml를 30분에 걸쳐 매우 천천히 첨가하여 반응물을 희석시켰다. 이때 반응물은 물과 격렬하게 반응하여 다량의 가스가 발생하므로 주의하여 매우 천천히 첨가해야 한다. 이후에 DI water 200 ml를 추가로 첨가하여 완전히 희석시킨 후 천천히 교반하면서 과산화수소(Samchun, 34.5%, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) 10 ml를 반응물에 첨가하고 2시간동안 ultrasonic bath에서 초음파 박리과정을 진행하였다. 이후에 체(sieve)를 이용하여 크기가 큰 입자를 걸러준 뒤, 16,000 rpm으로 10분간 원심분리하고 다량의 DI water를 이용하여 pH 7이 될 때까지 세척을 진행하였다. GO 현탁액(suspension)을 얻기 위하여 3,000 rpm의 저속으로 35분간 원심분리 후 상등액을 취하여 5,000 rpm에서 5분간 추가로 원심분리를 진행하였다. 수득된 물질을 70 °C 오븐에서 5시간동안 건조하였다. 아나타제 TiO<sub>2</sub>@GO 나노복합체를 합성하기 위하여

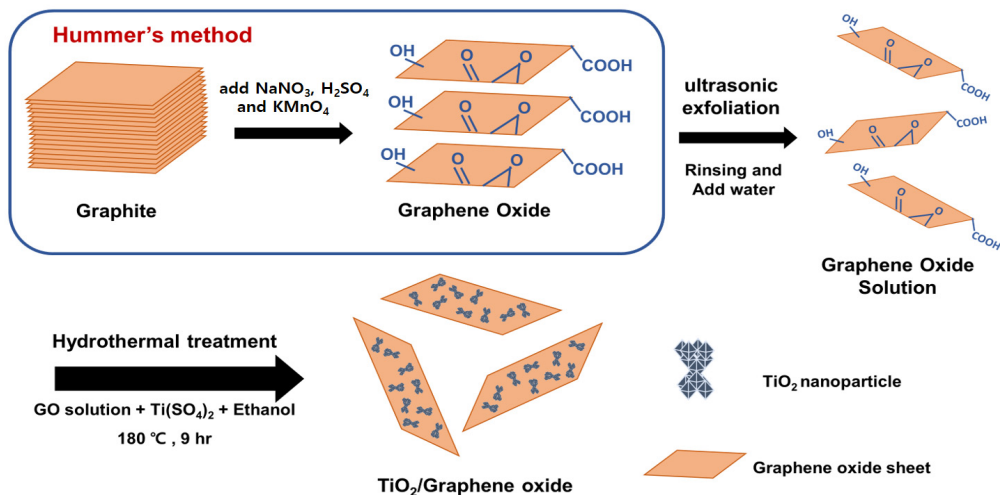


Fig. 1. Schematic diagram of synthesis process for anatase TiO<sub>2</sub>@GO nanocomposites photocatalyst by hydrothermal treatment

에탄올(Samchun, 95%) 20 ml에 titanium(IV) isopropoxide(Samchun, 99%,  $Ti(SO_4)_2$ ) 2.84 ml를 첨가하여 상온에서 30분 동안 300 rpm으로 교반하여 가수분해를 진행하였다. 이후에 건조된 GO를 0.5 mg/ml의 농도로 DI water에 재분산시킨 GO 용액 40 ml를 가수분해된 용액에 한 방울씩 천천히 첨가한 뒤 60분 동안 300 rpm으로 상온에서 교반하였다. 혼합물을 테플론컵에 옮긴 다음 autoclave를 이용하여 180 °C에서 9시간 동안 수열처리를 진행하였다. 수열처리 후 6,000 rpm에서 10분간 원심분리하고, 다량의 에탄올과 DI water로 세척한 다음 70 °C의 오븐에서 12시간 동안 건조시켰다.

아나타제  $TiO_2@GO$  나노복합체의 합성과 별도로 아나타제 상의  $TiO_2$  나노입자를 합성하였다. 합성과정은 위에 기술한 아나타제  $TiO_2@GO$  나노복합체 합성과정에서 GO 용액을 첨가하는 공정을 제외하고 동일하였다.

아나타제  $TiO_2$  나노입자와 아나타제  $TiO_2@GO$  나노복합체의 광촉매 활성도(photocatalytic activity)를 확인하기 위하여 메틸렌 블루(MB: Methylene Blue, 이하 MB) 용액의 광분해 실험을 진행하였다. 우선 methylene blue trihydrate(Samchun, 97.0%) 10 mg과 DI water 500 ml를 혼합한 후 상온에서 30분 동안 300 rpm으로 교반하여 20 ppm의 MB 용액을 제조하였다. MB 용액 50 ml에  $TiO_2$  나노입자 또는  $TiO_2@GO$  나노복합체 125 mg을 첨가하고 sonication 공정으로 균일하게 분산시킨 후, 400 rpm에서 10분 동안 추가로 교반하여 MB 용액에 나노입자가 균일하게 분산되도록 하였다. 가시광선 영역에서의 광분해 실험은 5 watt의 LED lamp를 이용하여 진행하였고, UV 영역에서의 광분해 실험은 6 watt의 파장 254 nm의 UV 광원을 이용하여 수행하였다. 이때 광원과 시료의 거리는 10 cm로 동일하였다. 광분해 실험의 모든 과정은 암막조건에서 실시되었으며, 빛을 조사하기 전에 시료를 채취하여 원심분리하고 UV-visible spectrometer로 흡광도를 측정하였다(0 min 시료). 가시광선과 UV를 일정시간 조사한 뒤 동일한 과정으로 시료를 채취하고 원심분리 후 흡광도를 측정하여 MB 용액의 광분해 정도를 측정하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

Hummer's 방법으로 합성된 GO와  $TiO_2$  나노입자 및  $TiO_2@GO$  나노복합체의 표면형상을 주사전자현미경

(FE-SEM: Field Emission Scanning Electron Microscope, 이하 FE-SEM)으로 분석하였고, 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다. GO 나노시트가 잘 합성된 것을 Fig. 2 (a)에서 확인할 수 있으며,  $TiO_2$  나노입자도 비교적 균일하게 잘 합성된 것을 Fig. 2 (b)에서 확인할 수 있다. 또한 GO 나노시트 표면에  $TiO_2$  나노입자가 균일하게 잘 결합되어 있는 것을 Fig. 2 (c)에서 확인할 수 있다.

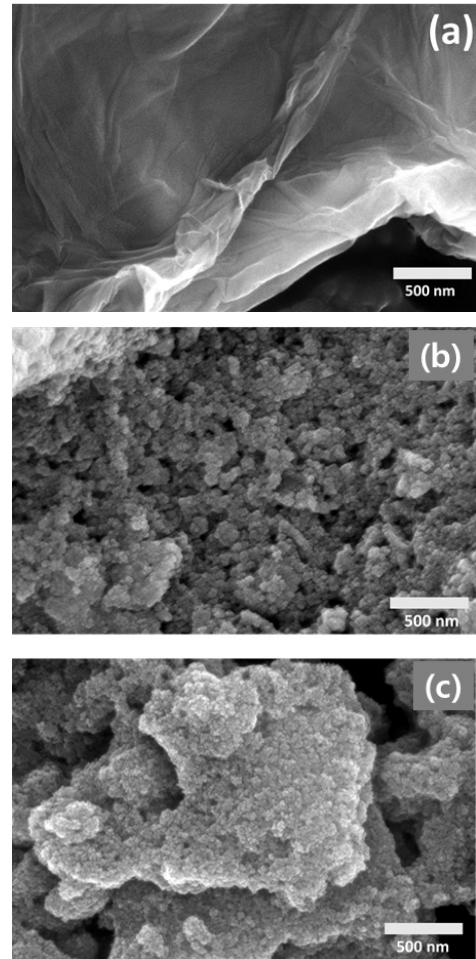


Fig. 2. FE-SEM images of (a) graphene oxide synthesized by Hummer's method, (b) anatase  $TiO_2$  nanoparticles synthesized by hydrothermal method and (c) anatase  $TiO_2@GO$  nanocomposites synthesized by hydrothermal treatment

합성된  $TiO_2$  나노입자와  $TiO_2@GO$  나노복합체의 결정학적 특성을 확인하기 위하여 Raman 분광학(Raman spectroscopy) 분석과 X선 회절(XRD: X-Ray Diffraction,

이하 XRD) 분석을 실시하였고, Fig. 3과 Fig. 4에 각각 그 결과를 나타내었다. Fig. 3의 Raman 분석에서 파수 145 cm<sup>-1</sup>, 388 cm<sup>-1</sup>, 512 cm<sup>-1</sup>, 및 639 cm<sup>-1</sup> 근처에서 관찰되는 Raman 피크들은 각각 아나타제 TiO<sub>2</sub> 나노입자의 E<sub>g</sub>, B<sub>1g</sub>, A<sub>1g</sub> + B<sub>1g</sub>, E<sub>g</sub> 모드에 해당하는 피크들이다[11]. 또한 파수 1355 cm<sup>-1</sup>와 1600 cm<sup>-1</sup> 근처에서 관찰되는 피크는 GO의 D band와 G band에 기인하는 피크이다. D band는 그래핀의 edge 또는 in-plane sp<sup>3</sup> defect와 disordered carbon에 기인하는 피크이며, G band는 탄소원자들이 sp<sup>2</sup> 결합으로 정렬되어 in-plane vibration할 때 나타나는 피크이다[11]. 따라서 Raman 분광학 분석으로부터 아나타제 TiO<sub>2</sub> 나노입자와 아나타제 TiO<sub>2</sub>@GO 나노복합체가 잘 합성된 것을 확인할 수 있다.

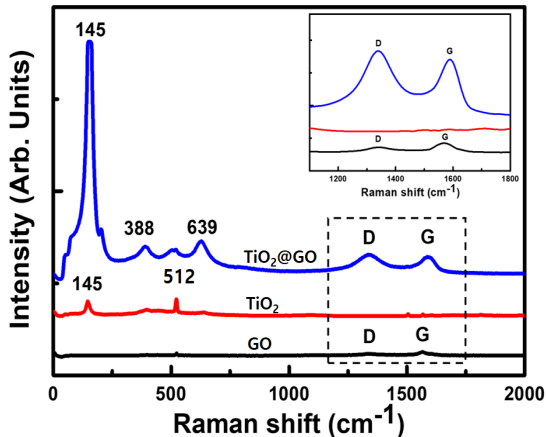


Fig. 3. Raman spectra of graphene oxides, anatase TiO<sub>2</sub> nanoparticles and anatase TiO<sub>2</sub>@GO nanocomposites

180 °C에서 9시간 동안 수열합성 된 TiO<sub>2</sub> 나노입자의 XRD 분석결과를 Fig. 4에 나타내었다. XRD 분석에서 결정상은 ICDD No. 98-000-5224(anatase), ICDD No. 00-003-0380(brookite), ICDD No. 00-001-1292 (rutile)로 확인하였다. 수열합성 공정으로 합성된 TiO<sub>2</sub> 나노입자는 합성조건에 따라 순수하게 단일상으로 합성될 수도 있지만, 보통은 여러 상이 혼재되어 합성된다[3,12,13]. 특히 200 °C에서 12시간 동안 수열합성 된 TiO<sub>2</sub> 나노입자의 경우, 아나타제 상이 79.2%, 루틸상이 20.8% 비율로 합성됨을 보고하였고 [12], 본 실험에서도 크게 다르지 않았다. 즉 수열합성 된 TiO<sub>2</sub> 나노입자는 대부분 아나타제 상이었으며, 미량의

루틸상과 오염 수준의 브루카이트 상이 혼재되어 합성되었다.

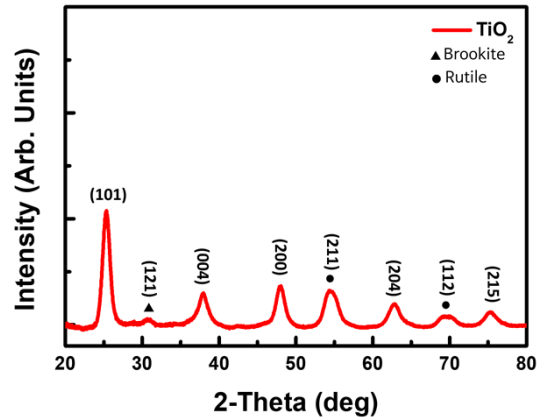


Fig. 4. XRD pattern of anatase TiO<sub>2</sub> nanoparticles synthesized by hydrothermal method for 9 hours at 180 °C

아나타제 TiO<sub>2</sub> 나노입자와 아나타제 TiO<sub>2</sub>@GO 나노복합체의 광분해 활성도를 확인하기 위하여 MB 용액의 광분해 실험을 진행하였고, 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 즉 아나타제 TiO<sub>2</sub> 나노입자가 분산된 MB 용액에 파장 254 nm의 UV를 조사하고, 조사되는 시간에 따라 MB 용액이 분해되는 정도를 Fig. 5 (a)에 나타내었고, 가시광선을 조사하면서 MB 용액이 분해되는 정도를 Fig. 5 (b)에 나타내었다. 자외선 및 가시광선이 조사되지 않은 상태에서 흡광도 그래프의 최대값을 100%로 정하고, UV 및 가시광선이 조사됨에 따라 측정되는 흡광도의 최대값을 상대적으로 환산하여 %로 표기하였다. 즉 아나타제 TiO<sub>2</sub> 나노입자의 경우, UV가 조사되는 환경에서는 2시간동안 MB 염료의 69%가 분해되었다. 하지만 가시광선이 조사되는 환경에서는 2시간 동안 MB 염료의 8%만이 분해되어 가시광선 영역에서 아나타제 TiO<sub>2</sub> 나노입자의 광촉매 활성도는 매우 낮은 것을 확인할 수 있다. Fig. 5 (c)에는 가시광선이 조사되는 환경에서 아나타제 TiO<sub>2</sub>@GO 나노복합체가 혼합된 MB 용액의 광분해 특성을 나타내었다. 이론적 계산에서 예측한 것처럼 [10] 아나타제 TiO<sub>2</sub>@GO 나노복합체의 광분해 활성도는 매우 높아서 가시광선이 30분 동안 조사되었을 때, MB 염료의 89%가 분해되는 우수한 광촉매 활성도를 나타내었다.

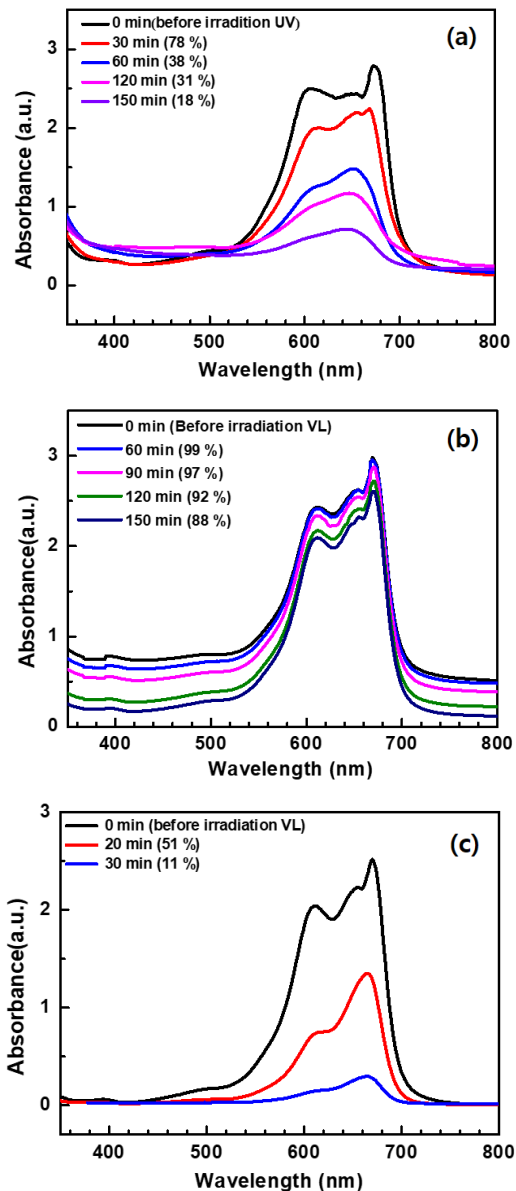


Fig. 5. UV-visible absorbance of methylene blue(MB) dye as function of exposure time (a) MB mixed TiO<sub>2</sub> nanoparticles under UV irradiation, (b) MB mixed TiO<sub>2</sub> nanoparticles under visible light(VL) irradiation and (c) MB mixed TiO<sub>2</sub>@GO nanocomposites under VL irradiation

#### 4. 결론

본 연구에서는 자외선 영역에서 우수한 광촉매 특성을 나타내는 아나타제 TiO<sub>2</sub> 나노입자를 Hummer's 방법을

로 합성된 그래핀 옥사이드와 졸-겔 공정 및 수열합성 공정으로 복합화하여 가시광선 영역에서도 높은 광촉매 활성도를 나타내는 TiO<sub>2</sub>@GO 나노복합체의 광촉매 물질을 합성하였다. 또한 가시광선 영역에서의 광촉매 활성도를 MB 용액의 광분해 특성 분석으로 평가하였다. 연구의 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

첫째, Sol-Gel 공정과 수열합성공정을 혼합하여 합성된 TiO<sub>2</sub> 나노입자는 거의 균일한 크기로 합성되었으며, 미량의 루틸 상이 나타나지만 대부분은 아나타제 결정상을 갖는 것으로 확인되었다.

둘째, GO와 복합화한 아나타제 TiO<sub>2</sub>@GO 나노복합체의 GO 표면에 TiO<sub>2</sub> 나노입자가 균일하게 결합되어 있는 것을 확인하였다. 또한 TiO<sub>2</sub>@GO 나노복합체의 Raman 분석결과, 아나타제 결정상의 TiO<sub>2</sub> 나노입자와 GO가 잘 복합화된 것을 확인하였다.

셋째, 아나타제 TiO<sub>2</sub>@GO 나노복합체 광촉매는 가시광선 영역에서 매우 우수한 광촉매 활성도를 나타내어 가시광선 조사 30분 만에 MB 용액의 89%가 광분해되었다.

아나타제 TiO<sub>2</sub>@GO 나노복합체는 가시광선과 자외선 영역에서 높은 광촉매 활성도가 필요한 응용분야에 적용될 수 있을 것으로 전망된다.

#### References

- [1] H. Rosling, O. Rosling, A. R. Rönnlund, Factfulness, p.473, Gimm-Young Publishers, 2019. pp.111-202
- [2] M. G. Kim, J. M. Kang, J. E. Lee, K. S. Kim, K. H. Kim, M. Cho, "Effect of calcination temperature on the phase composition, photocatalytic degradation, and virucidal activities of TiO<sub>2</sub> nanoparticles", *ACS Omega*, Vol.6, pp.10668-10678, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c00043>
- [3] C. Leyva-Porras, A. Toxqui-Teran, O. Vega-Becerra, M. Miki-Yoshida, M. Rojas-Villalobos, M. Garcia-Guaderrama, J. A. Aguilar-Martinez, "Low-temperature synthesis and characterization of anatase TiO<sub>2</sub> nanoparticles by an acid assisted sol-gel method", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol.647, pp.627-636, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.06.041>
- [4] J. S. Lee, K. H. You, C. B. Park, "Highly photoactive, low bandgap TiO<sub>2</sub> nanoparticles wrapped by graphene", *Advanced Materials*, Vol.24, Issue8, pp.1084-1088, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201104110>
- [5] F. Huang, D. Chen, X. L. Zhang, R. A. Caruso, Y-B. Cheng, "Dual-function scattering layer of submicrometer-sized mesoporous TiO<sub>2</sub> beads for high-efficiency

- dye-sensitized solar cells”, *Advanced Functional Materials*, Vol.20, Issue8, pp.1301-1305, 2010.  
DOI: <https://doi.org/10.1002/adfm.200902218>
- [6] American Chemical Society, Chemistry in Context, 10<sup>th</sup> Edition, p.454, Sciplus, 2021. pp.344-381
- [7] Tony Seba, Clean Disruption of Energy and Transportation, p.383, Kyobo book Centre, 2014. pp.18-380
- [8] American Chemical Society, Chemistry in Context, 10<sup>th</sup> Edition, p.454, Sciplus, 2021. pp.236-291
- [9] American Chemical Society, Chemistry in Context, 10<sup>th</sup> Edition, p.454, Sciplus, 2021. pp.86-126
- [10] P. N. O. Gillespie, N. Martsinovich, “Origin of charge trapping in TiO<sub>2</sub>/reduced graphene oxide photocatalytic composites: insights from theory”, *ACS Applied Materials & Interfaces*, Vol.11, pp.31909-31922, 2019.  
DOI: <https://doi.org/10.1021/acsami.9b09235>
- [11] D. Liang, C. Cui, H. Hu, Y. Wang, S. Xu, B. Ying, P. Li, B. Lu, H. Shen, “One-step hydrothermal synthesis of anatase TiO<sub>2</sub>/reduced graphene oxide nanocomposites with enhanced photocatalytic activity”, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol.582, pp.236-240, 2014.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.08.062>
- [12] S. Yamazaki, M. Kutoh, Y. Yamazaki, N. Yamamoto, M. Fujitsukr, “One-pot synthesis of long rutile TiO<sub>2</sub> nanorods and their photocatalytic activity for O<sub>2</sub> evolution: comparison with near spherical nanoparticles”, *ACS Omega*, Vol.6, pp.31557-31565, 2021.  
DOI: <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c04003>
- [13] Z. Yang, B. Wang, H. Cui, H. An, Y. Pan, J. Zhai, “Hydrothermal synthesis of crystal-controlled TiO<sub>2</sub> nanorods: rutile and brookite as highly active photocatalysts”, *The Journal of Physical Chemistry C*, Vol.119, No.29, pp.16905-16912, 2015.  
DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b02485>

김기출(Ki-Chul Kim)

[중심회원]



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

<관심분야>

에너지 저장 소재, 가스센서, 나노 바이오 응용 소재