Appl. Chem. Eng., Vol. 27, No. 3, June 2016, 307-312
http://dx.doi.org/10.14478/ace.2016.1037

Article

계면활성제를 이용한 수열합성법에 의한 $PbMoO_4$의 합성 및 그들의 광촉매 활성

홍성수

부경대학교 화학공학과
(2016년 4월 14일 접수, 2016년 5월 15일 심사, 2016년 5월 16일 채택)

Synthesis of $PbMoO_4$ Using a Facile Surfactant-assisted Hydrothermal Method and Their Photocatalytic Activity

Seong-Soo Hong

Department of Chemical Engineering, Pukyong National University, 365 Shinsunro, Nam-ku, Busan 48547, Korea
(Received April 14, 2016; Revised May 15, 2016; Accepted May 16, 2016)

초 록

$PbMoO_4$를 계면활성제를 이용하여 수열합성법으로 합성하였고, XRD, Raman, TEM, PL, BET 및 DRS 등에 의해 특성 분석을 하였다. 이들을 사용하여 자외선 조사 하에서 Rhodamine B의 광분해 반응에서의 활성을 조사하였다. XRD 및 Raman의 분석 결과로부터 계면활성제를 이용한 손쉬운 수열합성에 의해 잘 결정화된 $PbMoO_4$ 구조를 가진 촉매들이 합성되었으며 52에서 69 nm의 크기를 나타내었다. cetyltrimethylammonium bromide (CTAB)를 계면활성제로 사용하여 합성된 $PbMoO_4$는 P-25와 순수한 $PbMoO_4$ 보다 높은 광촉매 활성을 나타내었다. pH 9에서 합성된 $PbMoO_4$ 촉매가 가장 높은 활성을 나타내었다. 모든 촉매들은 540 nm 부근에서 강하고 넓은 PL 흡수밴드가 나타났으며, 이 피크의 세기가 커질수록 Rhodamine B의 광분해 활성이 증가하는 것으로 나타났다.

Abstract

Lead molybdate ($PbMoO_4$) was successfully synthesized using a facile surfactant-assisted hydrothermal process and characterized by XRD, Raman, TEM, PL, BET and DRS. We also investigated the photocatalytic activity of these materials for the decomposition of Rhodamine B under UV-light irradiation. From XRD and Raman results, well-crystallized $PbMoO_4$ crystals were successfully synthesized with the particle size of 52-69 nm. $PbMoO_4$ catalysts prepared in the presence of cetyltrimethyl ammonium bromide (CTAB) enhanced the photocatalytic activity compared to that of using P-25 and pure $PbMoO_4$ catalysts. The maximum photocatalytic activity of $PbMoO_4$ catalyst were observed when preparing it in pH 9 solution. The The PL peak at about 540 nm were observed for all catalysts and the excitonic PL signal increased proportionally with respect to the photocatalytic activity of Rhodamine B.

Keywords: *$PbMoO_4$ catalyst, surfactant-assisted hydrothermal process, photocatalytic decomposition of Rhodamine B*

1. 서 론

$PbMoO_4$ 산화물은 molybdates계에 속하는 회중석 구조(scheelite structure)를 가지고 있으며 광발광체, 고상 레이져, 광섬유, 섬광물질, 자성물질 및 촉매와 같은 넓은 분야에서 사용되고 있다[1,2]. 또한 이들은 Ca^{2+}, Sr^{2+}, Ba^{2+} 및 Pb^{2+}와 같은 양이온이 A에 위치하면 이들은 회중석 구조를 가지는 것으로 알려져 있다. 예전에 $PbMoO_4$는 높은 밴드갭(Eg = 3.3 eV) 때문에 자외선 조사 하에서 물의 분해에 의한 수소생성용 광촉매로써 연구되어져 왔다[3]. 그러나 불행하게도 대부분의 $PbMoO_4$ 산화물은 전통적인 고상반응법이나 액상법으로 제조함으로써 그들의 급격한 결정성장으로 인해 불규칙한 모양과 큰 입자 크기를 나타내었다[4].

나노크기의 반도체 광촉매는 기존의 금속산화물과는 다른 물리적 화학적 성질로 인해 많은 주목을 받고 있다[5]. 광촉매의 표면구조는 광촉매 활성에 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있는데, 이것은 광촉매 반응이 광유도된 전자와 정공이 촉매표면에 있는 경우에만 일어나기 때문이다[6]. 예를 들면 아나타제형 TiO_2의 (001) 결정면은 열역학적으로 안정한 (101) 결정면보다 활성이 훨씬 높다는 많은 이론적 및 실험적 연구가 보고되고 있다[7]. 따라서 나노입자의 표면개질은 촉매의 표면구조와 광촉매활성과의 관계를 규명하기 위한 유용한 방법일 뿐만 아니라 높은 활성을 가진 광촉매를 개발하기 위한 합리적인 접근방법이다. 일반적으로 높은 표면에너지를 가진 결정면은 결정성장이 진행되는 동안 표면에너지를 줄이기 위해 감소하게 된다. 또한, Zheng과 공동연구자들은 (010) 결정면을 가지는 γ-Bi_2MoO_6 화합

Author: Pukyong National University,
Department of Chemical Engineering, 365 Shinsunro, Nam-ku, Busan 48547, Korea
Tel: +82-51-629-6433 e-mail: sshong@pknu.ac.kr

pISSN: 1225-0112 eISSN: 2288-4505 @ 2016 The Korean Society of Industrial and Engineering Chemistry. All rights reserved.

물이 (131) 결정면을 가지는 화합물에 비해 높은 광촉매 활성을 나타낸다고 보고하였다[8]. 또한, 이들은 (010) 결정면을 가지는 γ-Bi_2MoO_6 화합물은 훨씬 많은 산소결함을 가지며 광여기된 전자와 정공의 재결합을 억제할 뿐만 아니라 OH 라디칼의 생성을 촉진시키기 때문으로 보고되고 있다. $PbMoO_4$ 화합물에서도 (100) 결정면보다 (001) 결정면이 표면에너지가 큰 것으로 알려져 있다[9]. 따라서 높은 활성을 보여주는 결정면을 가지는 균일하고 높은 순도의 $PbMoO_4$ 산화물을 합성하는 것은 여전히 중요한 도전과제이다.

본 연구에서는 나노크기의 $PbMoO_4$를 cetyltrimethylammonium bromide (CTAB)를 계면활성제로 사용하여 수열합성법 공정으로 제조하였다. 또한 TEM, DRS, PL, XRD, BET 및 Raman 등을 이용하여 촉매들의 물리적 특성을 조사하였다. 그리고 Rhodamine B의 분해반응에서 자외선 하에서 광촉매로서의 활성을 조사하였다.

2. 실 험

2.1. 촉매 제조

본 촉매는 계면활성제를 이용한 수열합성법을 사용하여 촉매를 합성하였다. 150 mL 용량을 가진 teflon-lined 스테인레스 스틸 고압반응기에 $Pb(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$, $(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$ 및 CTAB과 ethylene glycol 24 g을 넣고 혼합된 용액을 충분히 교반시키면서 반응시킨다. 또한, 4몰의 NaOH 용액을 주입하여 혼합 용액의 pH를 9로 조절하였다. 이 용액을 온도를 160 ℃로 유지하면서 고압반응기에서 12 h 동안 수열 합성시켰다. 이렇게 제조된 물질을 상온으로 식힌 다음 여과과정을 통해 얻어지는 고체 분말을 충분히 세척하여 불순물을 제거한 후 120 ℃에서 12 h 동안 건조시켜 제조하였다. 또한, $PbMoO_4$의 형태와 결정면에 대한 CTAB의 첨가양의 영향을 알아보기 위해 CTAB의 양을 0～0.1 M로 변화시켰다. 광촉매 활성 비교용으로 사용된 P-25 TiO_2(Degussa) 촉매는 구입하여 처리 없이 사용하였다.

2.2. 촉매 특성분석

제조된 촉매들의 결정 구조를 확인하기 위해서 X선 회절기(XRD, Philips X'pert diffractometer/Cu Kα radiation)를 사용하여 결정성을 확인하였으며, 제조된 촉매들의 흡광도 및 띠간격을 알아보기 위해 UV-vis diffuse reflectance spectroscopy (DRS)(Varian Cary 100)를 이용하여 측정하였다. 촉매의 미세구조 관찰 및 모양, 크기분포 등은 Transmission electron microscope (TEM, JEOL JEM-2020, Japan)를 사용하여 관찰하였고, 촉매의 분광학적 특징을 살펴보기 위해 상온에서 광원으로 Xe 램프를 장착한 photoluminescence spectrometer (PL, KIMMON KOHA, Japan)를 사용하였다. 제조된 촉매의 micro-Raman 스펙트라는 Raman spectrometer (Dimension-pl-Raman, USA)를 사용하여 측정하였다.

촉매의 표면적 측정을 위해 표면적 측정장치(Quntachrome, Autosorb-1 Surface Analyzer)를 이용하여 측정하였으며, 측정 시료는 200 ℃에서 1 h 동안 전처리시켰고, 분석방법은 연속흐름식으로 헬륨을 희석제로 하여 흡착물 질소의 분압을 변화시켜 흡착량의 변화를 BET식에 의해 해석하여 기울기와 절편으로부터 표면적을 계산하였다.

2.3. 반응활성 조사

제조된 촉매의 광촉매 활성 특성을 알아보기 위해 반응물 Rhodamine B에 대한 광활성 능력을 조사하였으며, 반응물의 초기농도는 10 ppm, 촉매 첨가량을 1 g/L, 반응액 양을 100 mL로 동일하게 하였다. 반응장치는 회분식 반응기, Xe 램프 조절기, Xe 램프, 냉각필터, 석영렌즈, 교반기 등으로 이루어져 있으며, 반응기는 내열유리로 제작되었으며 반응기 아래에 교반기를 설치한다. 광원으로는 300 W Xe램프를 사용하였으며 광원의 효율을 높이기 위해 반응기와 water filter를 알루미늄호일로 감싸 광원이 주변으로 누출되는 것을 차단시켰다. 반응물은 일정 시간마다 채취하여 UV-vis spectrophotometer (Mecasys Optizen Pop)를 이용하여 분석하였다. 이때 반응물의 흡광파장은 664 nm에서 흡광도를 측정하여 시간에 따른 농도변화를 확인하였다.

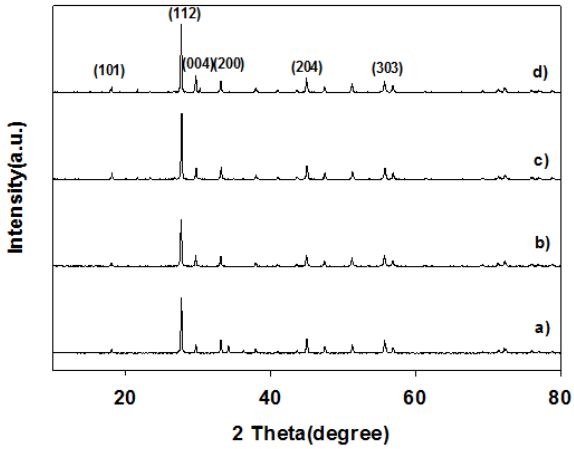

Figure 1. X-ray diffraction patterns of $PbMoO_4$ catalysts prepared using hydrothermal process at different CTAB concentrations : a) no CTAB, b) 0.05 M, c) 0.075 M and d) 0.1 M, synthesis temperature = 160 ℃, pH of solution = 9.

3. 결과 및 고찰

3.1. 촉매의 물리화학적 특성

CTAB의 농도를 달리하여 수열합성법으로 제조한 $PbMoO_4$ 산화물들의 결정성을 알아보기 위해 XRD 측정을 행하여 그 결과를 Figure 1에 나타내었다. 순수한 $PbMoO_4$ 산화물은 사면체 구조를 가지며, JCPDS No.가 44-1486으로 알려져 있다[10]. Figure 1에서 보여주듯이 CTAB의 농도에 상관없이 $I4_{1/a}$ 그룹에 속하는 사면체의 구조를 가지는 것으로 나타났다.

또한, 촉매들의 결정크기는 (112) X-선 회절 피크에 상응하는 라인의 넓이로부터 미세 결정크기 L을 Scherrer 식을 사용하여 아래와 같이 구할 수 있다[11].

$$L = \frac{K \cdot \lambda}{\beta \cdot \cos\theta}$$

위의 식으로부터 얻어진 촉매들의 결정의 크기는 Table 1에 나타내었다. CTAB 없이 합성된 $PbMoO_4$ 촉매의 결정의 크기는 52 nm를 나타내었으며, CTAB을 사용하여 합성된 촉매들의 결정의 크기는 52 nm에서 69 nm로 점차 증가하였다.

Figure 2에 계면활성제인 CTAB의 농도를 달리하여 수열합성법으로 제조한 $PbMoO_4$ 산화물의 150～1000 cm^{-1}의 범위에서 얻어진 Raman 스펙트럼의 결과를 나타내었다. 첨가된 CTAB의 농도와 무관하게 네 개의 특성피크를 나타내었다.

Table 1. The Physical Properties and Photocatalytic Activity of $PbMoO_4$ Catalysts Prepared at Different CTAB Concentration

Catalyst[a]	Particle size (nm)	Surface area (m^2/g)	[b]k' ($\times 10^{-3}$, min^{-1})
P-25	-		10.1
$PbMoO_4$ (no CTAB)	52	2.6	5.2
$PbMoO_4$ (0.05 M CTAB)	59	2.7	60.3
$PbMoO_4$ (0.075 M CTAB)	63	2.5	121.8
$PbMoO_4$ (0.1 M CTAB)	69	2.2	19.4

[a] synthesis temperature = 160 ℃, pH of solution = 9.
[b] apparent first-order constant (k_{app}) of photocatalytic degradation of Rhodamine B.

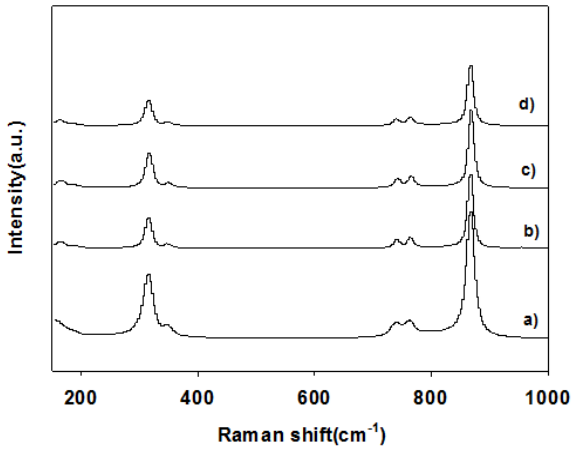

Figure 2. Raman spectra of $PbMoO_4$ catalysts prepared using hydrothermal process at different CTAB concentrations : a) no CTAB, b) 0.05 M, c) 0.075 M and d) 0.1 M, synthesis temperature = 160 ℃, pH of solution = 9.

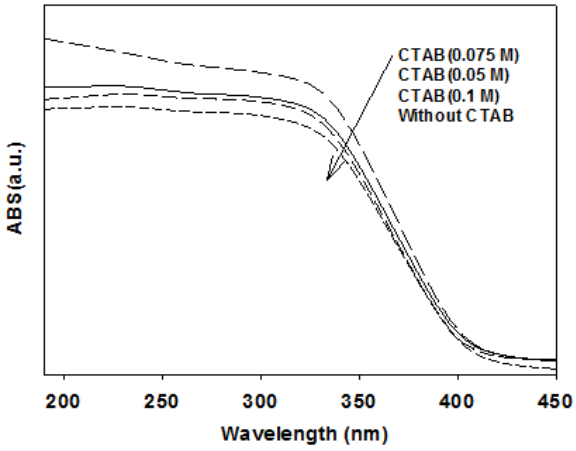

Figure 3. UV-Vis diffuse reflectance spectra of $PbMoO_4$ catalysts prepared using hydrothermal process at different CTAB concentrations : synthesis temperature = 160 ℃, pH of solution = 9.

먼저 869.5 cm^{-1}에서의 피크는 $PbMoO_4$ 결정 내의 $[MoO_4]$ 덩어리의 대칭성 신축진동모드인 $\nu_1(A_g)$ 때문인 것으로 알려져 있다[12]. 또한, 767.0 및 741.2 cm^{-1}에서의 피크들은 각각 비대칭성 신축 진동모드인 ν_3 (B_g) 및 ν_3 (E_g)에 기인하는 것으로 생각된다. 그리고 346.7 및 317.2 cm^{-1}에서의 두 피크는 $[MoO_4]^{-2}$ 사면체의 약한 ν_4 (B_g) 및 강한 $\nu_2(A_g)$ 진동모드로 해석된다. 이와 같은 결과는 순수한 $PbMoO_4$ 화합물의 특성 피크와 거의 같은 경향을 보여주고 있다[11]. 따라서 XRD 및 Raman 결과로부터 첨가된 CTAB의 농도와 무관하게 불순물이 나타나지 않았으며, 잘 결정화된 $PbMoO_4$ 화합물이 합성되었음을 알 수 있다.

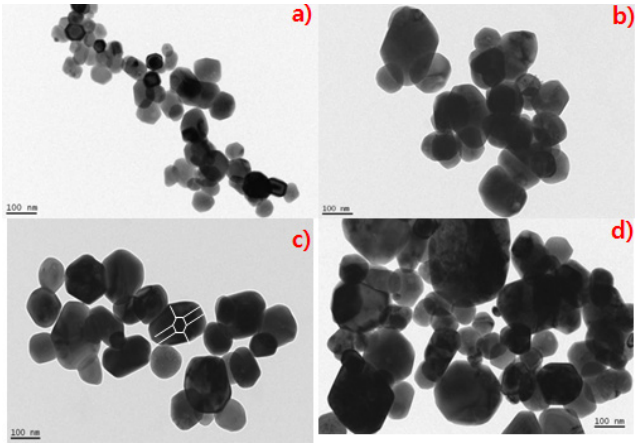

Figure 4. TEM images of $PbMoO_4$ catalysts prepared using hydrothermal process at different CTAB concentrations : a) no CTAB, b) 0.05 M, c) 0.075 M and d) 0.1 M, synthesis temperature = 160 ℃, pH of solution = 9.

광촉매들의 빛의 흡수에 대한 성질은 diffuse reflectance UV-Vis spectroscopy (DRS)에 의해 확인할 수 있다. Figure 3에 CTAB의 농도를 달리하여 수열합성법으로 제조한 $PbMoO_4$ 산화물의 DRS 결과를 나타내었다. Figure 3에 나타나듯이 첨가된 CTAB의 농도와 무관하게 $PbMoO_4$ 산화물들은 자외선 영역에서 비슷한 흡수스펙트럼을 보여주었다. 위의 DRS 곡선의 접선으로부터 $PbMoO_4$ 산화물들의 band gap을 구할 수 있는데, 대부분 3.2 eV 값을 나타내었다.

CTAB의 농도를 달리하여 수열합성법으로 제조한 $PbMoO_4$ 산화물의 형태를 TEM으로 측정하여 그 결과를 Figure 4에 나타내었다. Figure 4에 나타나듯이 CTAB을 사용하지 않고 제조한 촉매에서는 약 40 nm의 크기를 가진 입자들이 뭉쳐져 있는 것을 볼 수 있다. 그러나, CTAB의 양이 증가함에 따라 입자들의 크기가 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 $PbMoO_4$ 산화물의 형태는 구의 형태를 보여주고 있으며, CTAB의 농도가 0.075 M일 경우에는 규칙적인 18면체의 구조를 보여주고 있다(Figure 4(c)).

PL 분광계는 전하 운반체의 포집 효율 및 반도체 입자내부에서 생

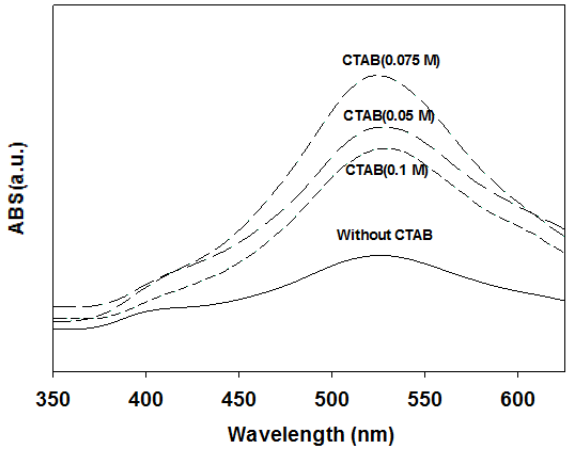

Figure 5. PL spectra of $PbMoO_4$ catalysts prepared using hydrothermal process at different CTAB concentrations: synthesis temperature = 160 ℃, pH of solution = 9.

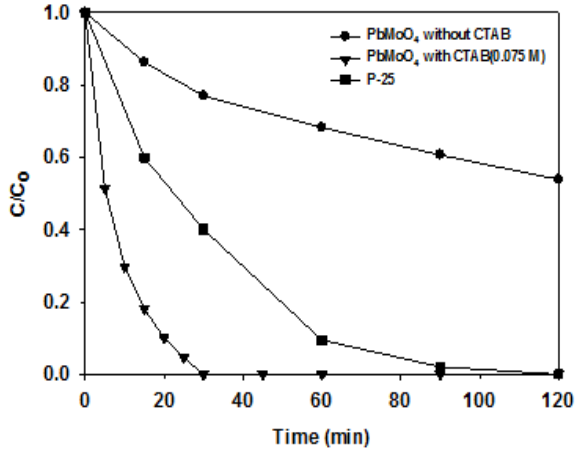

Figure 6. Photocatalytic decomposition of Rhodamine B over $PbMoO_4$ catalysts prepared using hydrothermal method at different CTAB concentration and P-25 catalyst: synthesis temperature = 160 ℃, pH of solution = 9.

기는 전자/전공쌍의 거동 등을 조사하기 위해 이용되는 분석방법이다. 여기광의 파장은 300 nm로 조사하였다. 촉매가 방출되는 빛의 발광에너지는 350∼650 nm 범위에서 측정하였다. Figure 5에 CTAB의 농도를 달리하여 수열합성법으로 제조한 $PbMoO_4$ 산화물의 PL 분석 결과를 나타내었다. CTAB의 농도와 관계없이 540 nm 부근에서 모두 같은 모양의 PL 피크를 나타내고 있다. 또한, CTAB을 사용하지 않고 합성된 $PbMoO_4$ 산화물의 PL 피크의 크기는 CTAB을 사용하여 합성된 촉매에 비해 작았으며, CTAB의 농도가 0.075 M일 경우 가장 높은 PL 피크가 나타났다.

일반적으로 금속 몰리브덴산염의 방출스펙트럼은 $[MoO_4]$ 덩어리 내부에서의 전하이동에 기인하는 것으로 알려져 있는데[13], PL 피크의 강도가 커질수록 산소 결함이나 공백의 정도가 커진다. 또한 광촉매반응이 진행되는 동안 산소 결함이나 공백은 전자와 정공이 재결합하는 것을 방지하기 위해서 빛에 의해 얻어진 전자를 포획하게 된다. 더구나 산소공백은 산소의 흡착을 증가시켜 산소공백과 결합된 전자와 흡착된 산소 간의 강한 상호작용이 생성된다. 이와 같은 결과는 산소공백의 광유도된 전자들의 결합이 동시에 생성된 흡착된 산소나 산소라디칼의 광유도된 전자들을 포획하게 된다. 따라서 산소공백이나 결함은 광촉매 반응에서 유기화합물의 산화반응을 촉진시키는데 강한 활성점으로 작용하게 된다. 결국 PL 피크의 강도가 커질수록 산소 결함이나 공백의 정도가 커지면서 광촉매 활성도 증가하게 된다.

3.2. 광촉매 활성

CTAB의 농도를 달리하여 수열합성법으로 제조한 촉매의 광분해 활성을 알아보기 위해 반응물 Rhodamine B에 대한 광활성 능력을 조사하였으며, 각각의 촉매들의 자외선 조사 하에서의 활성을 비교하였다. 또한, $PbMoO_4$ 산화물들의 광촉매 활성에 대한 결과는 자외선을 조사하기 전 단계에서 확인한 촉매 흡착실험에서 흡착은 거의 일어나지 않았다.

일반적으로 유기물질의 광분해 반응의 경우 Langmuir-Hinshelwood 속도식을 따른다고 알려져 있다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다[14].

$$-\frac{dc}{dt}=kC \tag{1}$$

그리고 이것을 적분해서 정리하면 최종적으로 다음과 같은 유사 1차 속도식으로 나타낼 수 있다.

$$\ln\frac{C}{C_o}=-k_{app}t \tag{2}$$

여기서 C_o와 C는 반응물의 초기농도 및 일정 반응시간(t) 후의 반응물 농도이며, k_{app}는 유사 1차 속도상수이다. 이 속도상수는 반응온도나 반응물의 pH 등의 반응 조건에 영향을 받으며, 이 값이 커질수록 그 촉매의 반응성이 커진다는 것을 나타낸다.

CTAB의 농도를 달리하여 수열합성법으로 제조한 $PbMoO_4$ 산화물 촉매를 사용하여 자외선 조사 하에서 Rhodamine B의 광분해 반응성을 Figure 6과 Table 1에 나타내었다. Figure 6에 나타나듯이 CTAB을 사용하여 제조한 $PbMoO_4$ 산화물 촉매는 CTAB을 사용하지 않은 촉매에 비해 높은 활성을 나타내었다. 또한, 널리 알려진 상업적인 광촉매인 P-25에 비해서도 높은 활성을 보여주고 있다. Zheng 등[8]에 의하면 γ-Bi_2MoO_6 화합물을 합성할 때 계면활성제를 사용하여 높은 광촉매 활성을 보이는 결정면의 성장을 촉진시킬 수 있다고 보고하고 있다. 따라서 $PbMoO_4$ 산화물의 제조 시 CTAB의 첨가는 수열합성공정에서 높은 광촉매 활성을 나타내는 특정 결정면의 성장에 중요한 역할을 하기 때문으로 생각된다.

또한, Figure 5에서 보여주듯이 PL 특성피크의 세기가 클수록 전자와 정공의 재결합을 효과적으로 막음으로써 Rhodamine B의 광분해 활성을 증가시키게 된다. Figure 5에 보여주듯이 $PbMoO_4$ 촉매의 PL 특성피크의 결과와 자외선 조사 하에서 Rhodamine B의 광분해 활성의 결과가 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

CTAB의 농도를 0.075M로 하고 용액의 pH를 달리하여 수열합성법으로 제조한 $PbMoO_4$ 산화물 촉매를 사용하여 자외선 조사 하에서 Rhodamine B의 광분해 반응성을 Figure 7과 Table 2에 나타내었다. 광촉매 활성은 pH가 증가함에 따라 증가하다가 pH = 9에서 최대값을 나타내었으며, 반응 시간 30 min 이내 Rhodamine B가 완전히 분해되었다.

Figure 8에 CTAB의 농도를 0.075M로 하고 용액의 pH를 달리하여 수열합성법으로 제조한 $PbMoO_4$ 산화물 촉매들의 PL 결과를 나타내었다. 용액의 pH와 관계없이 540 nm 부근에서 모두 같은 모양의 PL

Table 2. The Physical Properties and Photocatalytic Activity of $PbMoO_4$ Catalysts Prepared Using at Different pH Values of Solution

Catalyst[a]	Particle size (nm)	Surface area (m^2/g)	[b]k' ($\times 10^{-3}$, min^{-1})
$PbMoO_4$(pH=7)	52	2.5	5.7
$PbMoO_4$(pH=8)	52	2.5	59.8
$PbMoO_4$(pH=9)	59	2.5	121.8
$PbMoO_4$(pH=10)	59	2.1	29.0
$PbMoO_4$(pH=11)	69	1.2	8.3

[a] synthesis temperature = 160 ℃,CTAB concentration = 0.075 M.
[b] apparent first-order constant (k_{app}) of photocatalytic degradation of Rhodamine B.

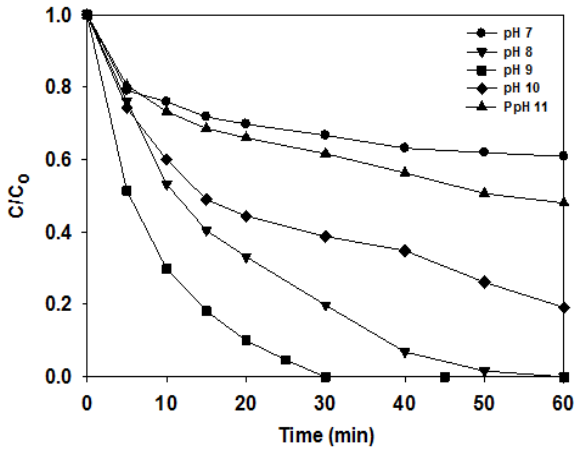

Figure 7. Photocatalytic decomposition of Rhodamine B over $PbMoO_4$ catalysts prepared using hydrothermal method at different pH of solutions : synthesis temperature = 160 ℃, CTAB concentration = 0.075 M.

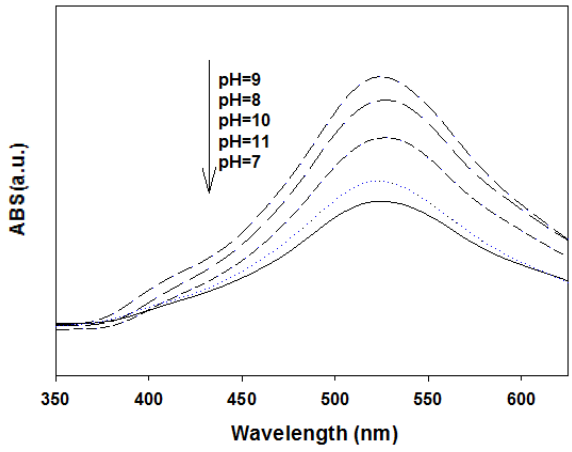

Figure 8. PL spectra of $PbMoO_4$ catalysts prepared using hydrothermal method at different pH of solutions : synthesis temperature = 160 ℃, CTAB concentration = 0.075 M.

피크를 나타내고 있다. 또한, Rhodamine B의 분해반응에 대한 광촉매 활성은 용액의 pH를 달리하여 제조된 $PbMoO_4$ 산화물 촉매들의 PL 피크의 강도의 순서와 잘 일치하고 있다. 앞에서 언급하였던 것처럼 결국 PL 피크의 강도가 커질수록 산소 결함이나 공백의 정도가 커지면서 광촉매 활성도 증가하게 된다.

4. 결 론

본 연구에서는 $PbMoO_4$ 산화물을 계면활성제를 첨가하여 수열합성법으로 합성하여 자외선 조사 하에서의 Rhodamine B의 광분해 반응에서의 활성을 조사하였다. 또한, 이들의 물리화학적 특성을 XRD, DRS, Raman, SEM 및 PL 등에 의해 조사하였다. XRD 및 Raman의 분석 결과로부터 계면활성제를 이용한 손쉬운 수열합성에 의해 잘 결정화된 $PbMoO_4$ 구조를 가진 촉매들이 잘 합성되었으며 52에서 69 nm의 크기를 나타내었다. CTAB을 계면활성제로 사용하여 합성된 $PbMoO_4$는 P-25와 순수한 $PbMoO_4$ 보다 높은 광촉매 활성을 나타내었다. pH 9에서 합성된 $PbMoO_4$ 촉매가 가장 큰 활성을 나타내었다. 모든 촉매들은 540 nm 부근에서 강하고 넓은 PL 흡수밴드가 나타났으며, 이 피크의 세기가 커질수록 Rhodamine B의 광분해 활성이 증가하는 것으로 나타났다.

감 사

본 연구는 부경대학교 자율창의학술연구비(2016년도)로 수행된 연구결과입니다.

References

1. H. Chen, C. Ge, R. Li, J. Wang, C. Wu, and X. Zeng, Growth of Lead Molybdate Crystals by Vertical Bridgman Method, *J. Phys. Chem. C*, **113**, 5812-5822 (2009).
2. J. Liu, J. Ma, B. Lin, Y. Ren, X. Jiang, J. Tao, and X. Zhu, Room Temperature Synthesis and Optical Properties of $SrMoO_4$ Crystallites by w/o Microemulsion, *Ceram. Int.*, **34**, 1557-1560 (2008).
3. S. Wu, H. Dong, and W. Wei, Investigations on the Local Structures and the EPR Parameters for Er^{3+} in $PbMoO_4$ and $SrMoO_4$, *J. Alloy Compd.*, **375**, 39-43 (2004).
4. K. Sayama, A. Nomura, Z. G. Zou, R. Abe, Y. Abe, and H. Arakawa, Photoelectrochemical decomposition of water on nano-crystalline $BiVO_4$ film electrodes under visible light, *Chem. Commun.*, **24**, 2908-2909 (2003).
5. Z. C. Wang, C. J. Medforth, and J. A. Shelnutt, Self-metallization of photocatalytic porphyrin nanotubes, *J. Am. Chem. Soc.*, **126**, 16720-16721 (2004).

6. A. Hameed, T. Montini, V. Gombac, and P. Fornasiero, Surface Phases and Photocatalytic Activity Correlation of Bi_2O_3/Bi_2O_{4-x} Nanocomposite, *J. Am. Chem. Soc.*, **130**, 9658-9659 (2008).
7. X. Q. Han, Q. Kuang, M. S. Jin, Z. X. Xie, and L. X. Zheng, Synthesis of titania nanosheets with a high percentage of exposed (001) facets and related photocatalytic properties, *J. Am. Chem. Soc.*, **131**, 3152-3153 (2009).
8. Y. Zheng, F. Duan, J. Wan, L. Liu, M. Q. Chen, and Y. Xie, Enhanced photocatalytic activity of bismuth molybdates with the preferentially exposed {010} surface under visible light irradiation, *J. Mol. Catal.*, **303**, 9-14 (2009).
9. M. Shen, Q. Zhang, H. Chen, and T. Peng, Hydrothermal fabrication of $PbMoO_4$ microcrystals with exposed (001) facets and its enhanced photocatalytic properties, *Cryst. Eng. Commun.*, **13**, 2785-2791 (2011).
10. J. Bi, L. Wu, Y. Zhang, Z. Li, J. Li, and X. Fu, Solvothermal Preparation, Electronic Structure and Photocatalytic Properties of $PbMoO_4$ and $SrMoO_4$, *Appl. Catal. B*, **91**, 135-143 (2009)
11. B. D. Cullity, Elements of X-Ray Diffraction, Adison-Wesley, Reading, MA (1978).
12. A. Phuruangrat, T. Thongtemb, and S. Thongtem, Synthesis of lead molybdate and lead tungstate via microwave irradiation method, *J. Cryst. Growth.*, **311**, 4076-4081 (2009).
13. J. C. Sczancoski, M. D. R. Bomio, L. S. Cavalcante, M. R. Joya, P. S. Pizani, J. A. Varela, E. Longo, M. S. Li, and A. Andre´s, Morphology and blue photoluminescence emission of $PbMoO_4$ processed in conventional hydrothermal, *J. Phys. Chem. C*, **113** 5812-5822 (2009).
14. W. Y. Jung, G. D. Lee, S. S. Park, K. W. Lim, M. S. Lee, and S. S. Hong, Synthesis of TiO_2 Supported on SBA-15 Using Different Method and Their Photocatalytic Activity, *J. Nanosci. Nanotech.*, **11**, 7446-7450 (2011).