

## 태양광/TiO<sub>2</sub> 반응기용 반사판 최적화에 관한 연구

김동석 · 박영식\*†

대구가톨릭대학교 환경과학과, \*대구대학교 보건과학부

### A Study on the Optimization of Reflector for Reactor Using Solar Light/TiO<sub>2</sub>

Dong Seog Kim · Young Seek Park\*†

Department of Environmental Science, Catholic University of Daegu, Gyeongbuk

\*Division of Health Science, Daegu University, Gyeongbuk

(Received April 25, 2006/Accepted July 18, 2006)

#### ABSTRACT

The photocatalytic reactor using immobilized TiO<sub>2</sub> on silicone sealant was studied bench scale using solar light as the source of radiation. The influences of parameters such as shape, polishing extent and size of reflector, distance between reactor and reflector, an angle of inclination between reactor system and ground, were studied using Rhodamine B (RhB) as a model compound, respectively. The decolorization of round type among the reflector shapes was higher than that of the polygon and W type. The polishing extent of the reflector did not show the decolorization largely. The optimum size of reflector and distance between reactor and reflector were 38 cm and 6 cm, respectively.

**Keywords:** UV/TiO<sub>2</sub>, light intensity, dye, solar light, immobilization

#### I. 서 론

섬유관련 산업에서 배출되는 폐수는 주로 염색 및 마무리 작업에서 발생되며, 고온으로 고농도의 BOD, COD를 유발하고, 부유물질 뿐만 아니라 색도유발물질 등을 함유하고 있다. 염색에 사용되는 현대의 염료는 다량의 유기물을 포함하고 있고 화학적으로 안정하기 때문에 종래의 생물학적 처리로는 탈색과 분해에는 효율적이지 못한 것으로 알려져 있다.<sup>1,2)</sup>

최근에는 염료나 염색폐수를 처리하기 위해 다양한 고도산화공정(Advanced Oxidation Process)이 적용되고 있다. 대표적인 방법으로 TiO<sub>2</sub>를 이용한 광촉매 분해 공정들이 이용된 바 있다.<sup>3,4)</sup>

광촉매로 사용되는 TiO<sub>2</sub> 분말은 광촉매 효율은 높지만, 반응 후 광촉매와 처리액을 분리해야 하는 문제가 발생한다. TiO<sub>2</sub> 분말의 입자 크기가 매우 작기 때문에 (<0.5 μm), 반응 후 광촉매를 완전히 회수하기 위해서

는 고가의 장치가 필요하다.<sup>5,6)</sup> 최근 이를 해결하기 위하여 국내·외에서 많은 연구가 이루어지고 있는데, 여러 가지 다양한 종류의 지지체(support)를 사용 즉, 스펀지, 석영관, stainless steel, 테플론 튜브, 실리카 beads 등의 담체에 TiO<sub>2</sub> 고정화를 시도하였는데,<sup>7-10)</sup> 외국의 경우 상업화가 이루어진 곳도 있지만 국내의 경우는 아직도 실험실 수준의 연구에 그치고 있는 실정이다.<sup>11,12)</sup>

광촉매를 이용한 폐수를 처리 공정에는 자외선에 의한 광자(photon)의 생성이 필수적인데, UV 램프를 이용한 광자의 인공적인 생성은 광촉매 폐수처리 공정에선 운전비용의 주요한 부분을 차지한다.<sup>13)</sup>

태양광은 풍부하게 이용할 수 있는 자연적인 에너지 원으로써 TiO<sub>2</sub>와 같은 반도체 물질의 조사에 편리하게 이용할 수 있다. 또한 태양광은 경제적이고 무해한 친환경에너지원으로써 외국에서는 1980년대 중반부터 연구되어 왔다.<sup>14,15)</sup>

대류권에 도달되는 태양광 중 293~400 nm 파장영역의 자외선을 이용한 광촉매 시스템이 유해 독성물질 제거에 적용 가능한 것으로 평가됨에 따라 미국, 유럽 및 일본 등에서는 분말 TiO<sub>2</sub>를 이용한 pilot 규모의 태

†Corresponding author : Division of Health Science, Daegu University

Tel: 82-53-650-8043, Fax: 82-53-650-8049

E-mail : ysparkk@daegu.ac.kr

양광 반응기가 지하수 정화, 상수도 정수처리 및 지표수의 독성 물질 처리에 적용하여 성공적으로 운전되고 있다.<sup>16-18)</sup>

외국의 경우 원형 석영관을 광촉매 반응기로 사용하는 분야의 연구에서 3가지 종류의 반사판(V-through, cylindrical, Involute 형)의 성능 비교와 설치 각도에 관한 연구 자료가 있지만 반사판 크기, 반응기와의 거리, 반사판의 광택정도 및 반응기와의 거리 등에 관한 태양광 반사판을 최적 조건에 대한 연구는 문헌에서 보이지 않는다.<sup>15,19,23)</sup>

그러나 국내에서는 원호형 반사판을 사용하고 석영관 반응기 하부에 UV 등을 장착하여 흐린 날에도 이용할 수 있는 태양광 광촉매 반응기에 관한 기초연구는 있으나 반사판 등 태양광을 효율적으로 이용할 수 있는 반응기 시스템에 관련된 연구는 거의 없는 편이다.<sup>5,16)</sup>

따라서 본 연구에서는 기존의 수처리 광촉매 시스템의 분말회수 및 전력 소비 문제를 해결하기 위하여 실리콘 실란트에 고정된 광촉매와 태양광을 이용할 경우 태양광을 효율적으로 이용할 수 있는 반사판 종류와 재질, 크기, 광택정도, 반응기와의 거리 및 설치 각도 등 반응기의 제작과 설치 등에 관한 내용으로 실험하고 성능을 비교하여 태양광 아래에서 효율적으로 고정화 광촉매를 사용하기 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

## II. 연구방법

### 1. 실험재료

본 실험에 사용한 염료는 Rhodamine B(RhB)로 사용하였으며, TiO<sub>2</sub>는 Degussa의 P-25(입자 크기: 30 nm, Anatase 구조: 70%, Rutile 구조: 30%, BET 표면적: 50 m<sup>2</sup>/g) 제품을 사용하였다.

실리콘 광촉매는 실리콘 실란트에 P-25 TiO<sub>2</sub>를 중량비로 12.4% 혼합한 후 P-25 TiO<sub>2</sub>가 뿌려져 있는 판에 놓고 상부에도 TiO<sub>2</sub>를 도포한 후 얇게 편 뒤 실온에서 48시간 건조시킨 후 작은 육면체로(길이: 1~2 mm, 넓이: 1~3 mm, 두께: 1.5~2 mm) 잘라서 사용하였다. 실리콘 광촉매 제조시 12.4% 이상의 투입량에서는 넓게 퍼지지 않고 덩어리로 성형되기 때문에 일정한 크기의 광촉매로 제조하기 어려워 12.4%를 투입하였다. 바인더인 실리콘 실란트에 TiO<sub>2</sub>를 혼합한 것은 표면에 코팅된 TiO<sub>2</sub>가 소실되어도 바인더에 혼합된 TiO<sub>2</sub>가 광촉매 반응이 이용가능하기 때문이었다.<sup>20)</sup> 광촉매의 성능을 테스트한 결과 광촉매 표면으로의 흡착능이 우수하여 초기 반응속도상수가 분말형 광촉매보다 빠른 것

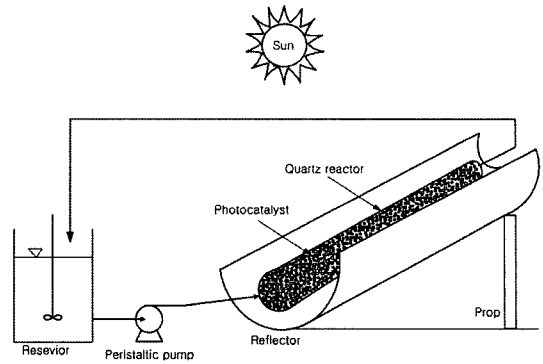


Fig. 1. The schematic diagram of reactor system.

으로 나타나 본 실험에 사용하였다.<sup>21)</sup>

### 2. 실험장치 및 실험방법

반응기 시스템은 크게 반사판과 고정화 광촉매가 충전된 반응기로 구성되고, 실험에 사용한 반응기는 석영관으로 된 재질의 충전층 반응기(외경, 22 mm; 내경, 20 mm)로 반응기 부피는 0.22 l이었다(Fig. 1). 반응기 하부는 알루미늄 재질로 만든 여러 가지 모양과 크기의 반사판을 설치하여 UV 광을 반사하도록 하였다. 반사판 크기는 18 cm, 석영관 반응기와 반사판 사이의 거리는 2 cm를 기준으로 실험하였으며, 최적 처리 조건을 구한 뒤부터 최적 조건에서 실험하였다. 폐수의 유량은 100 ml/min이었으며, 폐수로는 Rhodamine B(RhB)를 4.8 mg/l로 만들어 사용하였다. 폐수는 펌프를 이용하여 반응기 하부에서 상부로 유입시켰으며, 상부의 처리수는 저장고로 교반기로 교반되는 유입되어 펌프에 의해 다시 반응기로 공급되는 순환식 회전형 반응시스템이다. 실험은 2005년 9월에서 10월 사이에 실시되었으며, 바람과 구름이 없는 맑은 날 1시부터 실시하였다. 실험에 사용한 반응기는 3대를 사용하였으며, 날씨와 계절 변화에 따라 반응기 성능이 달라져 실험인자에 대한 성능비교가 어려워져 실험의 재현성에 문제가 발생하기 때문에 1대를 기준 반응기로 사용하여 날씨 변화에 따른 성능을 보정하는데 사용하였으며, 2대는 성능비교에 사용하였다.

### 3. 분석 및 측정

RhB의 농도는 UV-VIS spectrophotometer(Genesis 5, Spectronic)를 사용하여 RhB의 최대 흡수파장인 554 nm를 측정하여 검량선을 사용하여 나타내었다. 반사판 표면의 광세기는 254 nm의 센서를 장착한 자외선강도측정기(VLX-3W, Cole Parmer Instrument Co.)

를 사용하여 측정하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 반사판 형상과 광택정도가 성능에 미치는 영향

태양광을 이용하는 광촉매 반응기의 경우 지구표면에 도달되는 태양에너지의 5% 이하의 에너지를 이용하기 때문에 태양광을 효율적으로 이용하는 것이 중요하다.<sup>22)</sup> 알루미늄은 높은 자외선 반사력 때문에 태양광 반사판으로 사용된다. Herrmann 등<sup>23)</sup>은 300~400 nm에서 알루미늄은  $0.829 \leq R \leq 0.890$ 의 반사율을 나타낸다고 보고하였다. 폭이 18 cm인 알루미늄 판을 Fig. 2와 같은 모양으로 반사판을 제작하고 태양광을 반사시키기 위하여 알루미늄 호일을 부착시킨 후 실리콘에 고정화 광촉매가 충전된 석영관 반응기를 반사판 하부에서 2 cm 지점에 설치하여 태양광 하에서 반사판 종류에 따른 RhB 탈색을 고찰하여 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 3에서 보듯이 RhB 탈색은 원호(round) > 다각형(polygon) = W형의 순서로 나타났다. 반응초기 30분간에 대한 초기 반응속도식을 1차식(first order kinetics)으로 나타내고 초기 반응속도상수를 구한 결과 원호형은 0.0328 l/min, 다각형은 0.0272 l/min, W형은 0.0262 l/min으로 나타났다. 이와 같은 결과는 같은 반응기와 광촉매를 사용하고 인공 UV 광하에서 RhB 탈색 실험한 결과와 유사하게 나타났다.<sup>24)</sup>

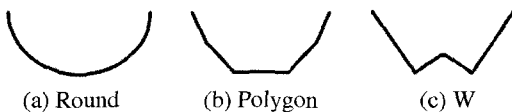


Fig. 2. Shapes of the reflector.

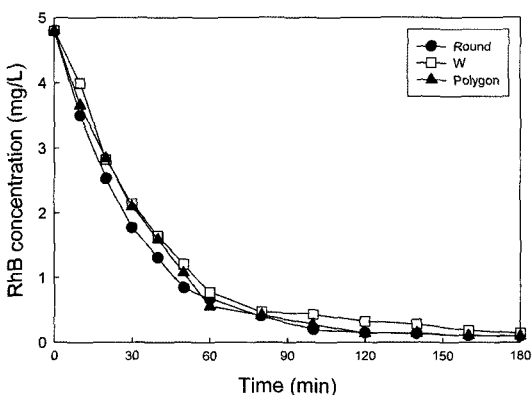


Fig. 3. Effect of reflector shape on the decolorization of RhB.

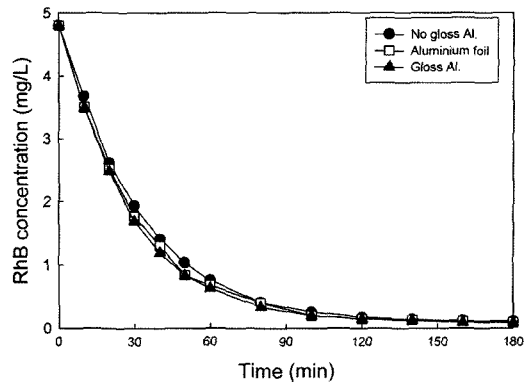


Fig. 4. Effect of surface polishing extent of reflector on the decolorization of RhB.

초기 반응속도가 가장 높은 원호형을 반사판으로 선택하여 광택이 없는 알루미늄 반사판과 알루미늄 호일을 씌운 반사판 및 형광등의 반사판으로 사용되는 광택이 나는 알루미늄 반사판을 사용하여 반사판의 광택 즉, 반사율이 다른 반사판을 사용하여 RhB 농도 감소를 고찰하여 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4에서 보듯이 광택 알루미늄 반사판을 사용한 광촉매 반응기의 RhB 농도 감소가 가장 높았으며, 다음은 알루미늄 호일 반사판, 가장 낮은 것은 무광 알루미늄 반사판이었다. 각 반사판에 따른 초기 반응속도상수를 구한 결과 광택 알루미늄 반사판은 0.0341 l/min, 알루미늄 호일은 0.0328 l/min, 무광 알루미늄 반사판은 0.0300 l/min로 나타나 반사율 정도에 따른 차이는 적은 것으로 나타났다.

#### 2. 반사판 크기가 성능에 미치는 영향

반사판의 크기는 태양광 반사에 영향을 미칠 것으로 판단하여 광택 알루미늄으로 원호형으로 제작한 반사판의 폭을 18~58 cm로 변화시켜 반사판 크기변화에 따른 RhB 탈색을 Fig. 5와 6에 나타내었다.

Fig. 5와 6에서 보듯이 반사판의 크기가 커질수록 RhB 농도감소율이 증가하는 경향을 나타내고 있다. 초기 반응속도 상수를 구한 결과 0.0325 l/min(18 cm), 0.0354 l/min(28 cm), 0.0410 l/min(38 cm), 0.0426 l/min(48 cm), 0.0442 l/min(58 cm)로 나타났다.

Fig. 7에 반사판 표면에 반사되는 태양광 중에서 312 nm의 광세기를 나타내었다. 자외선강도측정기의 센서는 254 nm, 312 nm, 365 nm의 세 가지로 구성되어 있으나 254 nm는 화창한 날이 아니면 측정되지 않았으며, 365 nm의 경우 강도가 가장 높게 나타났지만 자외선강도 변화가 너무 빠르게 변화하기 때문에 측정이 어

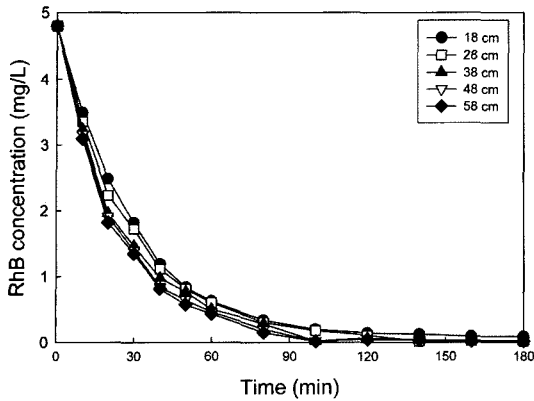


Fig. 5. Effect of reflector size on the decolorization of RhB.

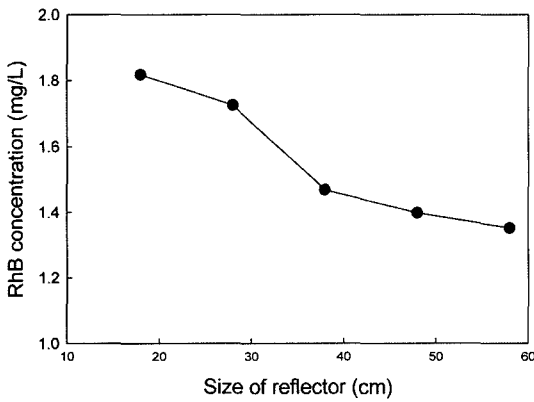


Fig. 6. Effect of reflector size on the decolorization of RhB (after 30 min).

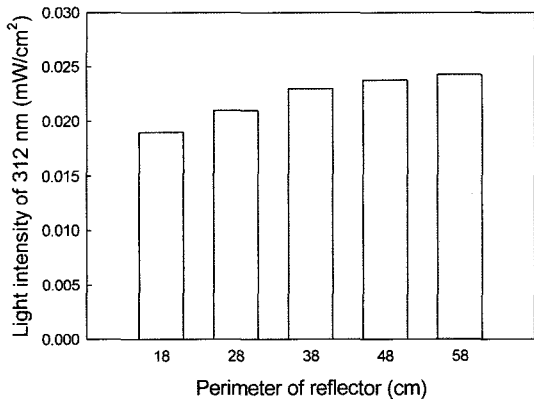


Fig. 7. Effect of reflector size on the light intensity at 312 nm.

려워 안정적인 값을 얻을 수 있는 312 nm에서 자외선 강도를 측정하였다. 그림에서 보듯이 반사되는 광세기 또한 반사판의 크기에 따라 반사되는 광 세기가 증가하는 경향을 나타내었으나, 38 cm 이상의 반사판에서의

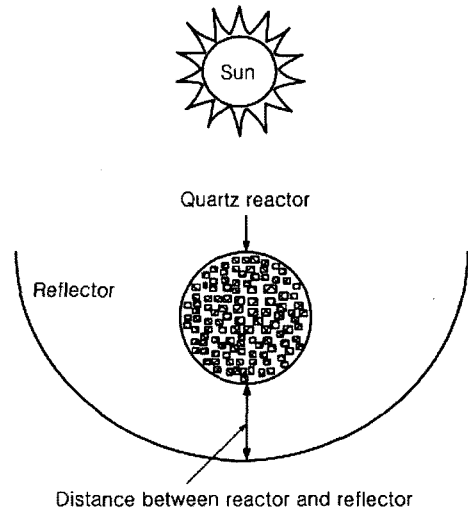


Fig. 8. Cross sectional diagram of reactor system.

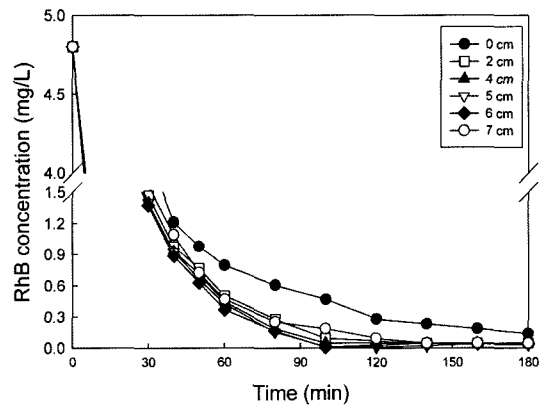


Fig. 9. Effect of distance between reactor and reflector on to the decolorization of RhB.

광세기 증가율은 감소되는 것으로 나타났다. 그러나 반사판의 크기가 48 cm 이상에서는 바람의 영향을 많이 받고 설치비용이 높고 설치면적을 많이 차지하기 때문에 최적 반사판 크기는 38 cm인 것으로 사료되었다.

3. 반응기와 반사판 사이의 거리가 성능에 미치는 영향

반사판 종류와 크기는 물론 석영관 반응기가 반사판에 놓이게 되는 위치도 광촉매 반응의 성능에 영향을 줄 수 있다. 모양이 원호형, 재질이 광택 알루미늄, 크기가 38 cm인 반사판을 선택하여 Fig. 8에 나타내었던 석영관 반응기와 반사판 사이의 거리를 0~7 cm 변화시켜 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다.

Fig. 9에서 보듯이 반응기와 반사판의 거리가 증가할수록 RhB의 농도감소량이 증가하였으며, 6 cm에서 최

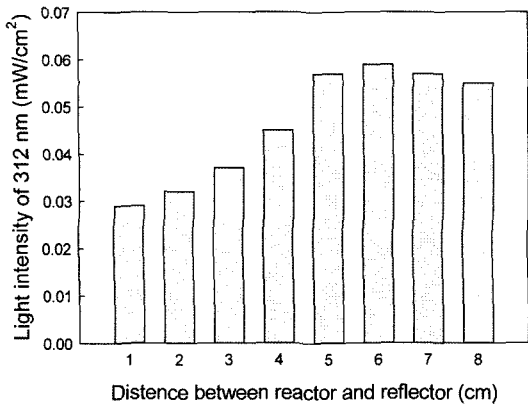


Fig. 10. Effect of distance between reactor and reflector on the light intensity at 312 nm.

대를 보인 후 7 cm에서는 감소하는 경향을 보였다. 반응기와 반사판 사이의 거리에 따른 초기 반응속도상수를 구한 결과 0.0310 l/min(0 cm), 0.0370 l/min(2 cm), 0.041 l/min(4 cm), 0.0419 l/min(5 cm), 0.0439 l/min(6 cm), 0.0406 l/min(7 cm)로 나타나 6 cm 지점이 최적 설치거리라는 것을 알 수 있었다. 반사판의 크기가 달라지면 최적 거리도 달라질 것으로 사료되었다. 석영관 광촉매 반응기와 반사판의 거리가 0 cm인 경우와 최적 거리인 6 cm는 1.4배의 차이를 나타내었다. 반응기가 반사판 바닥에 접촉되어 있는 0 cm의 경우 반응기 상부에 태양광을 동일하게 받지만 반사판 하부에서 광을 제대로 반사시키지 못하기 때문에 성능차이가 난다고 사료되었다. 또한 7 cm 이상에서는 하부에서 반사되는

광은 이용 가능하지만 측면에서 광을 효율적으로 반사시키지 못하기 때문에 최적 설치거리가 존재하는 것으로 사료되었다.

Fig. 10에 반사판에서 1~8 cm 떨어진 곳에 312 nm의 자외선강도 측정 센서를 반사판과 마주보게 설치 한 후 측정한 자외선강도를 나타내었다. 그림에서 보듯이 높이에 따른 자외선 강도가 반응기 높이에 따라 크게 달라지며 상부에서 조사되는 태양광의 세기는 같기 때문에 하부에서 반사되는 태양광을 효율적으로 이용하기 위해서는 자외선강도가 높은 위치에 반응기를 설치하는 것이 필요하다고 사료되었다.

#### 4. 반사판 설치 각도가 성능에 미치는 영향

태양광 광촉매 반응기의 효율을 높이기 위해서는 반응기와 반사판의 설치 각도를 태양의 남중고도각과 90°를 이루도록 반응기가 설치된 곳의 위도와 동일하게 하는 것이 바람직하다고 알려져 있으며, 태양광을 이용한 광촉매 반응기가 설치되는 나라의 위도에 맞게 설치된다.<sup>15,25)</sup>

우리나라의 위도 38°에 맞게 Fig. 11에서와 같이 태양에 대해 폭 방향(a), 길이 방향(b)으로 반응기 시스템을 놓고 경사각을 38°로 조절하여 경사각을 주지 않은 경우와 폭 방향, 길이 방향으로 경사각을 준 경우의 RhB 농도감소를 Fig. 12에 나타내었다.

그림에서 보듯이 폭 방향으로 경사각을 준 경우가 길이 방향으로 경사각을 준 경우보다 RhB 농도감소 폭이 큰 것으로 나타났다.

반응기와 지면과의 반사판 사이의 거리에 따른 초기

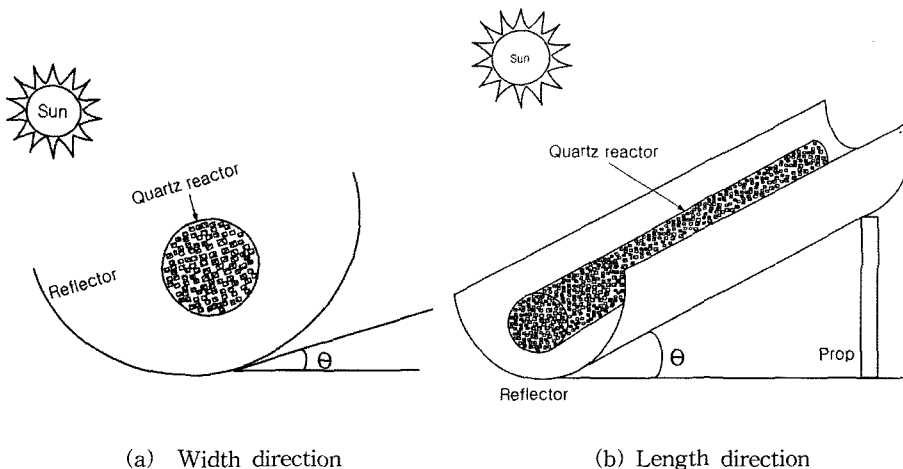


Fig. 11. Schematic diagram of an angle of inclination between reflector and ground.

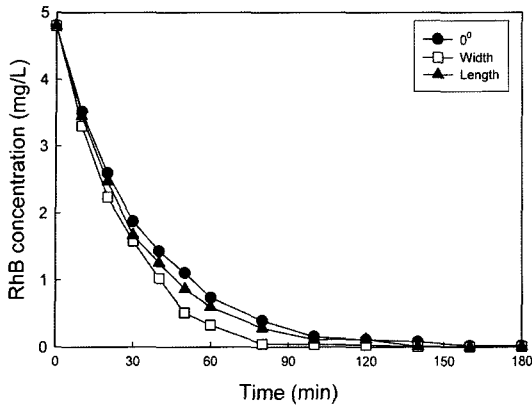


Fig. 12. Effect of an angle of inclination between reflector and ground on the decolorization of RhB.

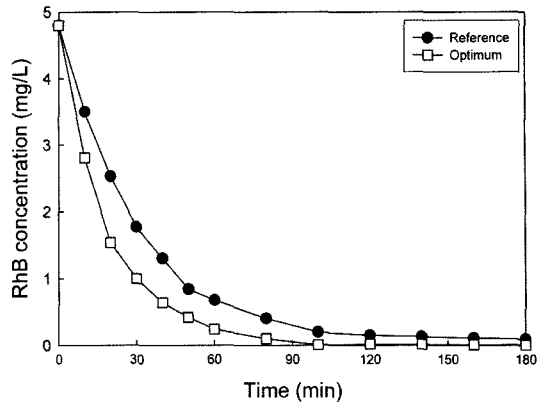


Fig. 13. Effect of an optimum reactor and reflector conditions on the decolorization of RhB.

반응속도상수를 구한 결과 경사각이 0°인 경우 0.0425 l/min, 폭 방향 경사각의 경우 0.0531 l/min, 길이 방향의 경우 0.0459 l/min로 나타나 폭 방향을 경사각을 주는 것이 길이 방향으로 경사각을 주는 것보다 광촉매 반응이 빠른 것으로 나타났다. 특히, 폭 방향으로 경사각을 준 경우는 시간의 경과에 따라 태양의 위치가 변하여도 태양광을 충분히 받을 수 있는 것이 관찰되었지만 길이 방향으로 경사각을 준 경우는 오전과 오후에는 반사판 일부에 그늘이 지는 것이 관찰되어 폭 방향으로 경사각을 주어야 한다고 사료되었다.

본 연구에서 반사판 형태, 광택정도, 크기, 반응기와 반사판 사이의 거리 및 반사판 설치 각도를 변화시킨 결과 반사판 형태에 따른 초기 반응속도상수 차이는 1.25배, 광택 정도에 따른 차이는 1.13배, 반사판 크기에 따른 차이는 1.26배, 반응기와 반사판 사이의 거리에 따른 차이는 1.4배, 반사판 설치 각도에 따른 차이는 1.25배로 나타나 반응기와반사판 사이의 거리가 본 실험에 사용한 형태의 광촉매 반응기에서 가장 중요한 인자이며, 반사판 형태, 반사판 크기, 반사판 설치 각도는 RhB 농도감소에 미치는 영향은 비슷하게 나타났으며, 반사판의 광택 정도는 가장 적게 영향을 주는 것으로 나타났다.

반사판 모양, 광택정도, 크기, 반응기와 반사판 사이의 거리 및 설치 각도 등은 최적 조건과 최적조건을 적용하기 전의 RhB 농도 감소는 그림(Fig. 3, 4, 5, 9, 및 12)에서 큰 차이를 보이지 않는다.

그러나 본 연구에서 구한 여섯 가지의 실험조건에서 구한 최적조건을 모두 적용한 경우와 적용하지 않은 경우는 차이를 나타낸다. 기준(반사판 종류 : 원호형 반사판, 반사판 재질 : 알루미늄 호일, 반사판 크기 : 18 cm,

반응기와 반사판 사이의 거리 : 2 cm, 태양에 대한 반사판 위치 : 폭 방향, 반사판 각도 : 0°) 실험한 조건과 최적 조건(반사판 종류 : 원호형 반사판, 반사판 재질 : 광택 알루미늄, 반사판 크기 : 38 cm, 반응기와 반사판 사이의 거리 : 6 cm, 태양에 대한 반사판 위치 : 폭 방향, 반사판 각도 : 38°) 을 모두 적용한 경우 RhB 농도 감소를 Fig. 13에 나타내었다. 두 경우의 초기 반응속도상수는 각각 0.0332 l/min(기준), 0.0531 l/min(최적조건 적용)으로 나타나 1.6배의 차이를 보였으며, RhB 초기농도 4.8 mg/l에서 0.1 mg/l로 감소하는데 소요되는 시간은 기준의 경우는 160분이 소요되지만 최적조건인 경우는 80분만 소요되어 반응종류에 걸리는 시간을 2배 정도 단축시키는 것으로 나타나 태양광과 같이 미약한 자외선을 이용하여 수처리를 할 경우 최적조건을 구하는 것이 초기 반응속도를 높이고 반응종결시간도 줄일 수 있는 것으로 사료되었다.

Table 1에 실험결과를 요약하여 태양광 광촉매 반응기에 대한 기본 설계인자를 반사판을 중심으로 나타내었다.

Table 1. Design factor for reflector using solar light/TiO<sub>2</sub>

Parameter of reflector	
Shape	Round
Material	Glossy aluminum
Size	38 cm
Distance between reactor and reflector	6 cm
Angle of inclination between reflector and ground	38°
Inclination between reflector and ground Width direction	

## IV. 결 론

수용성 염료인 Rhodamine B를 대상으로 태양광을 효율적으로 이용하기 위한 고정화 광촉매와 반응기 시스템을 개발하기 위하여 실리콘 실란트에 고정화 광촉매를 석영관 반응기에서 층진층으로 태양광하에서 운전한 결과 다음의 결론을 얻었다.

1. 반사판 모양에 따른 RhB 농도 감소를 고찰한 결과 원호형(round) > 다각형(polygon) ≃ W형의 순서로 나타났다. 초기 반응속도가 가장 높은 원호형을 기준으로 반사율이 다른 반사판을 사용한 결과 반사율 정도에 따른 성능차이는 적은 것으로 나타났다.

2. 반사판의 크기가 커질수록 반사되는 광세기와 RhB 탈색율이 증가하지만 38 cm 이상의 반사판에서의 광세기 증가는 감소되는 것으로 나타났으며, 최적 반사판 크기는 38 cm인 것으로 사료되었다.

3. 반응기는 반사판 하부와 측면에서 반사되는 광을 효율적으로 이용할 수 있는 위치에 설치하는 것이 상부에 조사되는 태양광만 이용하는 것보다 초기 반응속도가 빠르며, 38 cm의 반사판을 이용할 경우 최적 높이는 6 cm인 것으로 나타났다.

4. 반응기 시스템을 태양에 대해 폭 방향으로 설치하는 것이 시간에 관계없이 태양광을 효율적으로 이용할 수 있는 것으로 나타났다.

## 참고문헌

- 강준원, 박훈수, 최광호 : 이산화티타늄 광촉매에서의 광분해반응에 의한 유기물질 제거에 관한 연구. 대한환경공학회지, **17**(3), 283-294, 1995.
- Neppolian, B., Choi, H. C., Sakthivel, S., Arabindoo, B. and Murugesan, V. : Solar/UV-induced photocatalytic degradation of three commercial textile dyes. *J. of Hazardous Materials*, **B89**, 303-317, 2002.
- Sun, Z., Chen, Y., Ke, Q., Yang, Y. and Yuan J. : Photocatalytic degradation of cationic dye by TiO<sub>2</sub>/bentonite nanocomposite. *J. of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, **149**, 169-174, 2002.
- Habibi, M. H., Hassanzadeh, A. and Mahdavi, S. : The effect of operational parameters on the photocatalytic degradation of three textile dye dyes in aqueous TiO<sub>2</sub> suspension. *J. of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, **172**, 89-96, 2005.
- 김현용, 양원호 : 태양광/자외선/이산화티타늄(TiO<sub>2</sub>)을 이용한 에너지 절약형 광촉매 반응 처리시스템 개발. 한국환경위생학회지, **29**(1), 51-61, 2003.
- Venkatadri, R. and Peters, R. W. : Chemical oxidation technology: Ultra light/hydrogen peroxide, fentons reagent, an titanium dioxide-assisted photocatalysis. *Hazardous Waste & Hazardous Materials*, **10**(2), 107-149, 1993.
- 김동석, 박영식 : 스펀지에 고정화 광촉매를 이용한 안료의 광촉매 탈색. 한국환경보건학회지, **31**(5), 415-422, 2005.
- Fox, M. A. and Dulay, M. T. : Heterogeneous photocatalysis. *Chemical Review*, **93**, 341-357, 1993.
- Tang, W. Z. and An, H. : UV/TiO<sub>2</sub> photocatalytic oxidation of commercial dyes in aqueous solutions. *Chemosphere*, **31**, 4157-4170, 1995.
- 박영식 : 석영관 광촉매 반응기를 이용한 Rhodamine B의 색도 제거. 한국환경보건학회지, **30**(5), 358-365, 2005.
- Dillert, R., Cassano, A. E., Goslich, R. and Bahnemann, D. : Large scale studies in solar catalytic wastewater treatment. *Catalysis Today*, **54**, 267-282, 1999.
- Park, Y. S. and Kim, D. S. : Photocatalytic decolorization of rhodamine B by immobilized TiO<sub>2</sub> onto silicone sealant. *Chemical Engineering Journal*, **116**, 133-137, 2006.
- Well, M., Dillert, R. H. G., Bahnemann, D. W., Benz, V. W. and Muller, M. A. : A novel nonconcentrating reactor for solar water detoxification. *J. of Solar Energy Engineering*, **119**, 114-119, 1997.
- Matthews, R. W. : Photo-oxidation of organic material in aqueous suspensions of titanium dioxide. *Water Research*, **20**(5), 569-578, 1986.
- Noguelra, R. F. and Jaradin, W. F. : TiO<sub>2</sub>-fixed bed reactor and water decontamination using solar light. *Solar Energy*, **56**(5), 471-477, 1996.
- 조일형, 김현용, 성기석, 박정철, 이홍근 : 태양광/TiO<sub>2</sub> 시스템을 이용한 수중의 중금속-EDTA 제거에 관한 연구. 한국물환경학회지, **17**(1), 35-46, 2001.
- Pacheco, J. E., Prairie, M. R. and Yelloworse L. : Photocatalytic destruction of chlorinated solvents in water with solar energy. *J. Solar Energy Engineering*, **115**, 123-129, 1993.
- Malato, S., Blanco, J., Richter, C., Curco, D. and Gimenez, J. : Low-concentrating CPC collectors for photocatalytic water concentrating solar collector. *Water Science Technology*, **35**(4), 157-164, 1997.
- Ajona, J. I. and Vidal, A. : The use CPS collectors for detoxification of contaminated water: design, construction and preliminary results. *Solar Energy*, **68**(1), 109-120, 2000.
- Kim D. S. and Park, Y. S. : Photocatalytic decolorization of rhodamine B by immobilized TiO<sub>2</sub> onto silicone sealant. *Chemical Engineering Journal*, **116**, 133-137, 2006.
- 박영식 : UV/TiO<sub>2</sub>와 유동층 반응기를 이용한 안료의 광촉매 탈색. 한국환경과학회지, **13**(10), 921-928, 2004.
- Robert, D. and Malato, S. : Solar photocatalysis: a clean process for water detoxification. *The Science of the Total Environment*, **291**, 85-97, 2002.
- Herrmann, J. M., Disdier, J., Pichat, P., Malato, S. and Blanco, J. : TiO<sub>2</sub>-based solar photocatalytic detoxification of water containing organic pollutants. Case studies of 2,4-dichlorophenoxyaceti-

- cacid(2,4-D) and of benzofuran. *Applied Catalysis B*, **17**, 15-23, 1998.
24. 박영식, 김동석 : 고정화 광촉매와 충전층 반응기를 이용한 안료의 광촉매 탈색. 한국환경과학회 추계학술 발표회 논문집, **14**(2), 444-447, 2005.
25. 신인수, 이승목, 양재규, 신원태 : 태양광/TiO<sub>2</sub> 광산화를 이용한 Cu(II)-EDTA의 제거. 대한환경공학회지, **27**(2), 163-169, 2005.