광반응 반응기 내부의 에너지 분포와 라디칼 생성에 대한 연구

Evaluation of Hydroxyl radical Formation and Energy Distribution in Photolysis Reactor

남상건* · 황안나* · 조상현* · 임명희** · 김지형***

Nam, Sanggeon · Hwang, Anna · Cho, Sanghyun · Lim, Myunghee · Khim, Jeehyeong

Abstract

In this study, photochemical effects (OH radical formation) in the photoreactor was investigated to analyze UV-C intensity distribution. In addition, The influence radius of the UV-C lamp was measured at various dose of TiO_2 (Degussa P-25). The photoreactor used in this study was bath type reactor which is made by acrylic and the UV-C lamp (SANKYO DENKI, wavelength : 254 nm, Diameter : 2.2 cm, Length : 18.5 cm) was used as photo source. The maximum electric power consumption of the UV lamp was 10.5 W. The OH radical formation by UV-C was measured by KI dosimetry methods. From the results, the effective OH radical formation was occurred under the following condition. The reasonable distance of UV-C lamp is within 13 cm and the intensity of UV-C lamp should be more than 0.367 mW/cm^2 . Moreover, the concentration of catalyst affects on the influence radius of the UV lamp.

Key words : photolysis, photocatalysis, ultraviolet, reactor, Advanced Oxidation Process

요 지

본 연구에서는 광 반응기 내부의 영향반경을 평가하기 위해 자외선(UV-C) 램프의 강도와 photochemical에 의한 OH 라디칼 생성량을 측정하였다. 또한 TiO_2 (Degussa P-25)를 농도별로 첨가하여 자외선 램프의 영향반경을 측정하였다. 광 반응기는 아크릴 재질의 bath 타입을 사용하였고, 254 nm의 파장을 가진 UV-C 자외선 램프를(SANKYO DENKI, 지름 : 2.2 cm, 길이 : 18.5 cm) 사용하였다. 램프의 소비전력은 10.5 W이고, OH 라디칼 생성량을 측정하기 위해 KI dosimetry를 사용하였다. 실험 결과로부터 광 반응기에서 자외선의 강도가 0.367 mW/cm^2 이상 조사되어야하고, 거리는 13 cm 이내에서 OH 라디칼 생성에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 광촉매 반응기에서는 촉매의 농도로 인해 자외선의 영향반경이 매우 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 광반응, 광촉매반응, 자외선, 반응기, 고도산화처리공정

1. 서 론

최근 무분별한 산업 발전으로 인해 파괴된 환경에 대한 관심이 높아지면서 환경을 복원하고 환경오염을 줄이기 위한 처리기술 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 기존의 활성슬러지 공정과 같은 생물학적 처리방법, 응집·침전 방법, 활성탄 흡착 방법, 막 분리법 등의 물리·화학적 처리방법들을 조합한 여러 가지 처리방법 등이 다양하게 사용되지만 이러한 처리방법으로는 난분해성 유기물질들이 완벽하게 처리되고 있지 않는 문제점이 발생하고 있다.

이러한 기존 처리공정의 한계를 극복하기 위한 방법으로 오존, H_2O_2 , NaOCl 과 같은 강한 산화제를 이용하여 난분해성 유기물을 이산화탄소(CO_2)와 물(H_2O)로 완전 산화시키

는 화학적 산화방법이 있으나, 단순 산화방법으로는 난분해성 유기물을 완벽하게 처리하기에는 한계가 있고, 경제적인 측면에서 비용이 많이 소요되는 단점이 있다. 기존 산화제를 이용한 공정의 성능이 낮아 산화 성능을 높이기 위해 고도산화처리 공정(AOP)을 이용한 염색폐수와 난분해성 유기물 처리에 많은 관심이 집중되고 있다. 그 중에서도 특히 오염물질을 처리하기 위해 자외선을 이용한 광촉매(TiO_2)와 같은 기술과 혼합하여 새로운 고도산화처리공정(AOP)이 개발되고 다른 산화제보다 산화력이 매우 강력한 OH 라디칼(2.8 eV)을 발생시켜 수용액상에 페놀, 합성염료, 난분해성 유기물 등과 같은 오염물질을 이산화탄소(CO_2)와 물(H_2O)로 완전 산화시켜 처리하는 방법들이 대표적으로 고려되고 있다(Riga 등, 2007; CHUNDE 등, 2001; Berberidou 등, 2007; Muruganandham

*정회원 · 고려대학교 건축사회환경공학부 석사, 박사과정 (E-mail : namsang84@korea.ac.kr)

**고려대학교 건축사회환경공학부 BK21 건설사업 글로벌 리더 양성 사업단 연구교수

***고려대학교 건축사회환경공학부 교수 (교신저자)

등, 2006).

고도산화처리 공정에서도 자외선을 이용한 연구에 대한 관심이 높는데 이는 난분해성 유기물을 완전히 산화시켜 분해할 수 있을 뿐만 아니라 처리 후 슬러지 발생 등 오염물질의 발생이 거의 없고, 생성되는 미량의 무기·유기 물질들도 기존의 처리방법으로 쉽게 처리할 수 있고 간단한 처리공정을 거친 후 재이용이 가능한 장점을 가지고 있다. (Ricardo A. Torres-Palm 등, 2010; Herrmann 등, 1999).

자외선의 파장의 범위는 가시광선보다는 짧고 X-ray보다는 긴 파장을 가진 100 nm~400 nm의 파장을 말하며, UV-A(315~400 nm), UV-B(280~315 nm), UV-C(200~280 nm), Vacuum UV(100~200 nm)로 구분되어 있다.

UV-A 영역의 파장은 광촉매(TiO_2)를 이용한 고도산화공정에서 주로 사용되고 있고, UV-B 영역의 파장은 Dorno선이라 불리며 피부에 홍반작용을 일으킨다(Shin 등, 2001). UV-A와 UV-B의 경우 이 파장을 DNA가 거의 흡수하지 못하기 때문에 직접적인 소독용으로는 사용하고 있지 않다. 200nm 이하의 Vacuum UV는 파장이 매우 짧아 빛의 투과성이 낮고 흡수성이 매우 높다(Oguma 등, 2001). 그러므로 물속에서의 투과율이 효과적이지 못하고 에너지가 있어도 소독용으로 사용하기에는 한계가 있지만 오염물을 산화시키는 OH 라디칼 생성에 대한 연구는 현재 연구가 활발히 진행되고 있다. 병원성 미생물의 불활성화에 사용되는 영역의 자외선 파장은 200~280 nm(UV-C)로 이 파장 영역의 빛을 살균선이라고 불리며, 특히 254 nm의 경우 DNA가 가장 잘 흡수하는 파장이므로 현재 수처리에 이용되는 자외선 소독램프의 대부분은 254 nm의 파장을 방출하는 램프를 주로 사용하고 있다.

그 외에도 화학적인 측면에서 자외선 파장은 오존을 잘 분해하기 때문에 오존/자외선 공정에서도 주로 사용되고 있고, 고도산화처리공정(Advanced Oxidation Process)에서도 사용되고 있다(Chin 등, 2005). 또한 상수처리 공정에서 병원성 미생물을 살균하는데 일반적으로 사용하며, 다른 화학약품을 이용한 살균 방법보다 더욱 효과적인 것으로 잘 알려져 있다. 하지만, 대부분의 이전 연구에서 Lap-scale의(1 L 이내) 반응기를 사용하여 실제 현장적용을 하기 위한 확대에는 다소 무리가 있다.

큰 사이즈의 반응기 혹은 실제 현장 적용을 위한 반응기의 경우 내부의 자외선 에너지의 분포에 큰 영향을 미치는 자외선 램프의 간격, 반응기 형태 등이 주요 설계 인자가 될 수 있기 때문에 자외선의 영향반경에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 Large-scale의 자외선 반응기와 광촉매 반응을 이용하여 반응기 내부의 자외선 강도와 라디칼 생성량을 측정하여 영향반경을 측정하는 것을 연구 목표로 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 실험 장치

본 연구에서 사용한 광반응 실험 장치는 bath 형태(L : 0.6 m, H : 0.25 m, W: 0.11 m)로 아크릴 재질로 만들어졌다. 그림 1에 모식도를 나타내었다.

광반응 반응기에서 자외선 램프(Sankyo Denki)는 반응기 끝부분에 설치되었으며, 자외선의 광원은 254 nm(UV-C)의 중심파장을 갖고 소비전력은 10.5 W로 power meter(METEX M-4660 M)로 측정하였다. 램프의 제원은 지름 2.2 cm, 길이 18.5cm를 사용하였다. 반응기 내부의 수위는 16cm로 증류수로 약 10 L가 채워졌다. pH는 6.8, 온도는 20~25°C로 고정하여 실험하였다.

자외선 강도 측정은 램프를 점등 후 5분 동안 안정화 후 일정한 강도를 방출하는 시점에서 그림 1 (a)와 같이 Radio Meter (VILBER LOURMAT, RMX - 3 W, France)를 이용하여 자외선 램프의 중간 부분에서 거리에 따라 자외선의 강도를 측정하였고, 1 cm 간격으로 측정을 하였다. Radio Meter의 프로브는 자외선 투과율이 90%인 석영관 안에서 강도를 측정하였다. 자외선 램프의 자외선 강도 변화를 위한 적용 유입 파워는 자외선 램프 개수로 조절 하였다.

OH 라디칼 생성량의 측정은 각 위치에서 시험관 형태의 석영관(직경 2 cm, 길이 30 cm, 두께 0.2 cm, HANJIN QUARTZ CO., Korea) 안에 potassium iodide (KI) solution 20 mL로 진행하였고, 60 min 간 자외선을 조사하였고, 측정 위치는 표 1에 나타내었다.

KI dosimetry를 이용한 OH 라디칼 분석은 UV-vis spectrophotometer(Analyticjena, SPECORD 40, Germany)를 이용하였다(Son 등, 2009).

광촉매로 사용한 분말 TiO_2 (P-25, Degusa Chemical Co., Germany)는 평균입자 크기가 30 nm이고 anatase와 rutile 비율이 3 : 1, BET surface는 50 m^2/g 이다. 실험에 사용한 광촉매(P-25 TiO_2)는 전 처리과정 없이 사용하였고, 농도는 이

그림 1. (a) 광 반응기에서의 자외선 강도 측정 실험 (b) 광 반응기에서의 OH radical 생성 실험.

표 1. OH 라디칼 생성량 측정 위치

Distance (cm)	3	6	10	13	19	34
UV intensity (mWcm^{-2})	1.327	0.829	0.526	0.392	0.266	0.135
Degradation percent of intensity (%)	100	62	39.6	29.5	20	10.1

그림 2. 광 촉매반응기에서의 자외선 강도 실험

전 연구들(Ricardo A. Torres-Palm 등, 2010)에서 사용한 광촉매 농도를 기준으로 선정하였다.

촉매(TiO_2)를 첨가한 자외선 강도 측정에서는 촉매의 분산을 위해 400 rpm 으로 교반하며 강도 측정을 하였고, 촉매의 농도는 0, 5, 10, 50, 100, 200, 300 mg/L 으로 진행하였다. 광촉매 반응기의 모식도를 그림 2에 나타내었다.

2.2 실험방법

자외선 램프의 강도를 측정하기 위해 Radio Meter(RMX-3W)를 이용하였다. Radio Meter의 프로브는 자외선의 투과율이 90%인 석영관을 제작하여 석영관(HANJIN QUARTZ CO., Korea) 안에 고정하여 측정하였다.

측정원리는 자외선의 빛이 프로브에 전달되면 mW/cm^2 의 단위로 자외선의 강도가 표시되며, 프로브의 직경은 1.5 cm이고 면적은 1.767 cm^2 이다.

KI dosimetry를 이용한 라디칼 생성량 측정은 자외선을 조사한 KI solution(10g/L)의 샘플을 셀에 3.5 mL 담아 생성된 I_3^- 이온을 UV-vis spectrophotometer(Aanalyticjena, SPECORD 40, Germany)를 이용하여 350 nm에서 나타나는 흡광도의 peak 값을 측정하였다(Son 등, 2009).

본 연구에서 사용한 KI dosimetry는 Potassium iodide를 증류수에 용해시키면 I^- 이온이 되고 이 용액에 자외선을 조사하면 광반응에 의해 OH 라디칼이 물속에서 발생하게 된다(Wayne 등, 1996).

발생한 OH 라디칼에 의해 I^- 이온이 식(1)과 같이 산화되어 식(2)와 같은 반응으로 I_2^- 이온이 생성된다.

이때 용액에 존재하고 있는 I^- 이온과 I_2^- 이온이 식(4)과 같은 반응에 의해 I_3^- 이온이 생성된다. 생성된 I_3^- 이온의 농도를 라디칼 생성량에 대한 간접적인 지표로 나타낼 수 있다.

반응식은 다음식과 같다(CHUNDE 등, 2001; Son 등, 2009).

KI 용액에 자외선을 조사 후 측정을 위해 3.5ml 샘플을 셀에 담아 UV - vis spectrophotometer(Aanalytic jena SPECORD

40)로 생성된 I_3^- 이온을 350 nm의 파장에서 나타난 peak를 통해 흡광도로 나타낼 수 있다.

이 연구에서 KI solution의 농도는 10 g/L 사용하였다(Son 등, 2009).

3. 결과 및 분석

3.1. 거리에 따른 OH 라디칼 생성량

거리에 따른 자외선 강도변화와 OH 라디칼 생성량의 변화를 알아보기 위해 실험을 하였고, 그 결과는 그림 3에 나타내었다. 거리에 따른 자외선의 강도는 측정 위치가 증가하면 지수그래프의 양상으로 감소하는 것으로 나타났고, OH 라디칼 생성량도 비슷한 양상을 나타내면서 감소하는 것으로 나타났다.

이 같은 결과는 (Choi 등, 2009)의 시뮬레이션 데이터와 값의 차이는 보였지만, 감소하는 경향은 비슷한 양상을 보였다. 그 이유는 시뮬레이션에서 고려한 조건이 물에서의 투과율과 반사율 등을 모두 고려하여 실제 측정 데이터와 같은 양상을 보인 것이라고 판단된다.

램프와의 거리가 10 cm 에서는 자외선램프에서의 거리 3 cm에서 측정된 자외선의 강도($1.34 \text{ mW}/\text{cm}^2$)보다 60%이상 감소한 강도($0.492 \text{ mW}/\text{cm}^2$)가 측정된 것으로 보아 자외선이 수중에서 상당량 흡수되는 것을 확인할 수 있었다.

OH 라디칼 생성량 또한 강도가 감소함에 따라서 감소하는 경향을 보였는데, 자외선의 강도가 가장 높은 램프로부터 3 cm 거리에서의 흡광도는 0.3648이며, 자외선의 강도가 60% 감소한 10 cm 거리에서는 흡광도가 0.2289로 나타났다. 이 수치는 자외선 강도가 50% 감소하면서 라디칼의 생성량이 40% 가량 감소한 값이다. 이로부터 자외선의 강도와 OH 라디칼 생성량의 관계는 자외선의 강도가 감소하면 OH 라디칼의 생성량도 감소하는 경향을 확인 할 수 있다. 또한, 자외선 강도가 $0.367 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 인 13 cm에서는 흡광도가 0.2254로 나타났고, 13 cm 이후에서는 0.1839로 급격히 감소하는 것으로 보아 자외선의 강도가 $0.367 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 이상 조사되어야 OH 라디칼이 활발하게 생성되는 것으로 판단된다.

측정된 자외선 강도에 따른 OH 라디칼 생성량의 데이터를

그림 3. 거리에 따른 자외선의 강도와 OH 라디칼 생성량

(a) 자외선 강도

(b) OH 라디칼 생성

그림 4. (a) Input Energy를 증가 시켰을 때의 자외선 강도 (b) OH 라디칼 생성량 변화

기초로 하여, 광반응기의 내부에서 거리에 따른 에너지 영향을 알 수 있고, 간단한 자외선 강도 측정실험을 통해 OH 라디칼 생성정도를 예측할 수 있다 판단된다.

3.2. 자외선 강도에 따른 OH 라디칼 생성량

자외선 강도에 따른 OH 라디칼 생성량을 알기 위해 자외선 램프를 추가하여 실험하였다. 그림 4(a)는 자외선 램프를 추가하여 초기 파워의 10.5 W 보다 2배 증가한 21 W로 설정하여 거리에 따른 자외선 강도를 측정 한 그래프이다. 자외선 램프는 실험하였던 한 개의 램프 옆 부분에 동일한 조건의 자외선 램프를 설치하여 강도를 측정하였다.

그 결과 20 cm 내에서는 자외선의 강도는 램프 한 개 (10.5 W)일 때 보다 두 개의 자외선 램프(21 W)를 설치한 실험에서 20% 가량 증가하였고, 20 cm 이후에서의 강도는 램프 한 개일 때의 강도와 큰 차이를 보이지 않았다.

Input energy를 두 배 높여준 만큼의 효과를 보이지 못하는 결과가 나왔다. 그 이유는 실험 조건에서 램프 하나에서 나오는 최대 자외선의 강도는 변함이 없기 때문에 램프를 추가하여 강도를 측정하여도 나올 수 있는 강도의 한계가 있기 때문이라고 예상된다. 추후의 실험에서는 이 점을 보완하기 위해서는 사용하는 램프의 다른 모든 조건(제원, 램프의 파장, 재질)이 동일하고 Input energy만 증가되는 다른 하나의 램프를 사용하여 측정하여 비교·분석할 예정이다.

그림 4 (b)의 그래프에서는 램프의 개수를 늘려 Input power를 높여준 조건에서의 KI solution을 이용한 OH 라디칼 생성량은 10 cm 반경 안에서 효과가 큰 것으로 나타났고, 10 cm 반경 이후에서는 큰 효과를 확인 할 수는 없었다. 하지만 이는 램프가 증가함에 따라 자외선에 노출된 시편관의 면적이 넓어져 나온 결과로 예상되고 강도 증가에 의한 OH 라디칼 생성량이라고 보이지 않는다.

적절한 OH 라디칼 생성량을 확인하기 위해서는 파워가 높고, 사이즈가 같은 램프로 실험을 진행하여야 할 것이다.

3.3. 광촉매 주입농도에 따른 자외선 강도 변화

광촉매 주입농도에 따른 선행 연구에서는 광촉매(TiO_2) 주

그림 5. 광촉매(TiO_2) 첨가 후 거리에 따른 자외선 강도 측정(TiO_2 conc. : 0, 5, 10, 50, 100, 200, 300 mg/L)

입농도를 100~1000 mg/L 범위로 조절하여 실험을 수행하였고(Maezawa 등, 2007; Wang 등, 2008), 본 실험에서는 광촉매 주입농도를 0~300 mg/L로 조절하였다. 그림 5의 실험 결과 광촉매의 농도가 100 mg/L 이상에서는 3 cm 이후에는 자외선의 강도의 수치가 0 mW/cm^2 으로 나와 자외선이 3cm 까지 도달하지 못하는 것으로 확인되었다.

어느 정도 이상 촉매를 주입할 경우, 빛의 투과가 감소되고, 활성점이 입자 사이의 응집에 의해 감소하게 되어(Kaneco, 2004) 영향반경을 감소시키며, 자외선의 강도가 감소하여 반경 3 cm 이후에는 광촉매 반응이 일어나지 않는 것으로 판단된다. 실험 조건상 램프와의 거리가 3 cm 이전에는 자외선의 강도를 측정할 수 없었기 때문에 3 cm 이전에서의 자외선 강도는 측정할 수 없었다.

광촉매 주입 후 거리에 따른 자외선 강도 측정 데이터를 통해 광촉매 반응에서는 램프 표면 근처 (3 cm 이내)에서만 OH 라디칼이 생성되므로 램프의 표면적을 넓혀주는 것이 OH 라디칼 생성량에 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다. 그렇게 때문에 광반응기와는 달리 광촉매 반응기 설계 시 광촉매의 농도에 따른 자외선 램프의 간격과 배치가 매우 중요한 변수가 된다.

4. 결 론

본 연구에서는 Large-scale 의 광 반응기를 대상으로 거리에 따른 자외선 강도와 OH 라디칼 생성량을 측정하고, 다양한 촉매 농도에서 자외선의 강도 측정 및 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 광반응기 내부에서 자외선(UV-C)의 강도가 0.367 mW/cm² 이상 조사되어야 OH 라디칼 생성에 효과적이고, 10.5 W의 소비전력을 사용하는 자외선 램프에서의 최적 거리는 10~13 cm 로 산정되었다.
 - 2) 광촉매 반응기에서는 광반응기와는 달리 광촉매의 농도에 따라 자외선 램프의 거리 간격과 배치가 중요하고, 또한 램프 간격과 배치는 촉매의 농도에 따라 달라진다.
 - 3) 수용액상 적정량 이상의 촉매가 존재할 경우, 자외선은 반사되거나 흡수되어 자외선이 방출되는 거리가 짧아진다. 따라서 반응기에 따라 적절한 촉매 주입농도를 도출해야 한다.
 - 4) 램프의 선택을 신중히 하여 반응기를 제작하여야 하고, 램프의 표면적을 넓혀 촉매와 접하는 부분을 최대한 확장해야 효과적인 광촉매 반응이 일어날 것으로 사료된다.
- 추후 같은 조건의 자외선 램프에서 파워만 높여 강도와 OH 라디칼 생성량을 비교하는 연구와 광촉매 반응기에서의 OH 라디칼 생성량에 대한 연구가 필요하다.

감사의 글

“이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. KRF-2009-0092799).”

참고문헌

Berberidou, C., Poullos, I., Xekoukoulotakis, N.P. and Mantzavinos, D. (2007) Sonolytic, photocatalytic and sonophotocatalytic degradation of malachite green in aqueous solutions, *Appl. Catal. B.*, Vol.74, pp. 63-72.

Chin, A. and Berube, P.R. (2005) Removal of disinfection by-product precursors with ozone-UV advanced oxidation process, *Wat. Res.*, Vol.39, pp. 2136-2144.

Choi, Younggyun, Kim, Dooil and Kim, Sunghong (2009) A Study on Optimal Design of UV Contactor using an Optical Radiation Model, *Journal of Korean Society on Water Quality*, Vol.25, No.4, pp.547-552.

Chunde Wu, Xinhui Liu, Dongbin Wei, Jinchu Fan and Liansheng Wang (2001) Photosonochemical Degradation of Phenol in

Water, Wat. Res., Vol.35, No.16, pp. 3927-3933.

Herrmann, J.M. (1999) Heterogeneous photocatalysis: fundamentals and applications to the removal of various types of aqueous pollutants, *Catalysis Today*, Vol.53, pp. 115-129

Kaneco, S., Rahman, M.A., Suzuki, T., Katsumata, H. and Ohta, K. (2004) Optimization of solar photocatalytic degradation conditions of bisphenol A in water using titanium dioxide, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, Vol.163, pp. 419-424.

Maezawa, A., Nakadoi, H., Suzuki, K., Furusawa, T., Suzuki, Y. and Uchida, S. (2007) Treatment of dye wastewater by using photocatalytic oxidation with sonication, *Ultrason. Sonochem.*, Vol.14, pp. 615-620.

Muruganandham, M. and Swaminathan, M. (2006) Advanced oxidative decolourisation of Reactive Yellow 14 azo dye by UV/TiO₂, UV/H₂O₂, UV/H₂O₂/Fe²⁺ Separation and Purification, *Technology*, Vol.48, pp. 297-303.

Oguma, K., Katayama, H., Mitani, H., Morita, S., Hirata, T. and Ohgaki, S. (2001) Determination of pyrimidine Dimers in *Escherichia coli* and *Cryptosporidium parvum* during UV light Inactivation, Photoreactivation, and Dark repair, *Appl. Environ. Microbiol.*, pp. 4630-4637.

Ricardo A. Torres-Palma, Jessica I. Nieto, Evelyne Combet, Christian Pétrier, Cesar Pulgarin, 2010, An innovative ultrasound, Fe²⁺ and TiO₂ photoassisted process for bisphenol a mineralization, *Wat. Res.*, Vol.44, pp. 2245-2252.

Riga, A., Soutsas, K., Ntampeliotis, K., Karayannis, V. and Papapolymerou, G. (2007) Effect of system parameters and of inorganic salts on the decolorization and degradation of Procion H-exl dyes. Comparison of H₂O₂/UV, Fenton, UV/Fenton, TiO₂/UV and TiO₂/UV/H₂O₂ processes, *Desalination*, Vol.211, pp. 72-86.

Shin, G.A., Linden, K.G., Arrowood, M.J. and Sobsey, M.D. (2001) Low-pressure UV Inactivation and DNA Repair Potential of *Cryptosporidium parvum* Oocysts, *Appl. Environ. Microbiol.*, pp. 3029-3032.

Son, Younggyu, Lim, Myunghee and Khim, Jeehyeong (2009) Investigation of acoustic cavitation energy in a large-scale sonoreactor, *Ultrason. Sonochem.*, Vol.16, pp. 552-556.

Son, Younggyu, Lim, Myunghee, Song, JiHyeon and Khim, Jeehyeong (2009) Liquid Height Effect on Sonochemical Reactions in a 35 kHz Sonoreactor, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.48, pp. 07GM16.

Wang, L., Jiang, X. and Liu, Y. (2008) Degradation of bisphenol A and formation of hydrogen peroxide induced by glow discharge plasma in aqueous solutions, *J. Haz. Mat.*, Vol.154, pp. 1106-1114.

Wayne, C.E. and Wayne, R.P. (1996) Photochemistry, Oxford University Press, pp. 21-22

◎ 논문접수일 : 10년 11월 12일
 ◎ 심사의뢰일 : 10년 11월 12일
 ◎ 심사완료일 : 11년 01월 31일