

## 광촉매를 이용한 수처리 기술동향 및 향후전망



김 현 용

(주)이앤비코리아 대표이사

### 1. 서론

최근 산업이 발달하면서 환경오염문제가 날로 심각해지고, 오염원에 대한 규제도 강화되고 있어, 오염물질을 제거하기 위한 여러 가지 방법들이 강구되고 있는 실정이다. 일반적으로 사용하고 있는 수처리 기술을 살펴보면 미생물을 이용한 생물학적 처리기술과 여과, 응집, 침전 또는 흡착 등의 물리화학적 처리기술로 나눌 수 있다. 그러나 이러한 기술들은 많은 양의 슬러지가 생성되거나 고가의 설비투자 또는 다량의약품사용으로 인하여 설치비나 운전비가 많이 소요되고 있는 현실이다. 또 생물학적 처리의 경우 비교적 처리 속도가 전반적으로 느리고 전체 반응계가 생물학적 활성을 나타낼 수 있는 처리조건이 까다롭다는 문제점이 있어, 난분해성 물질을 제거하기가 매우 어렵다. 따라서 이러한 문제점들을 극복하기 위한 새로운 수처리기술의 개발이 필요하며 이와 같은 관점에서 최근 고도산화처리기술(AOP: Advanced Oxidation Process)에 대해 많은 연구가 이루어지고 있다.<sup>[1][2]</sup>

고도산화처리기술이라 하는 것은 보통의 산화공정에서 사용하는 산화제보다 더욱 강력한 산화력을 가지는 OH 라디칼(산화전위차: 2.8V)을 생성시켜 이 라디칼이 물

에 함유되어 있는 유기화합물을 CO<sub>2</sub>나 H<sub>2</sub>O 또는 HCl 등의 무해한 화합물로 분해시키는 기술을 말한다. OH라디칼은 유기물과의 반응속도 상수가 10<sup>9</sup>~10<sup>10</sup>M<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>로 매우 빠르고 거의 모든 유기물과 반응한다는 장점을 가지고 있어 모든 AOP공정은 가능한 많은 양의 OH라디칼을 생성하는데 목표를 두고 있다. 이러한 기술로는 오존(O<sub>3</sub>)이나 과산화수소에다 UV를 조사하는 방법(UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), 철염(II)과 과산화수소를 사용하는 Fenton 산화법 그리고 TiO<sub>2</sub> 등 반도체 금속산화물과 UV를 이용한 광산화 기술(UV/TiO<sub>2</sub>) 등이 있다.<sup>[3],[4]</sup> 오존 시스템의 경우에는 높은 pH에서 OH라디칼을 발생시키면서 유기물을 분해시키지만 OH라디칼의 생성율이 낮고, 일부 유기물과 반응이 느리거나, 어떤 유기물과는 전혀 반응하지 않는 등 유기물과의 반응에서 선택적이며, 특히 독성가스로서 물에 대한 용해도가 낮고, 오존 발생기 자체가 고가의 장비이며, 오존 누출에 대한 안전 문제가 야기된다. UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 시스템의 경우에는 근자외선영역에서 빛의 흡수능이 매우 낮으므로 일반적으로 사용되고 있는 파장인 254nm의 저압수은램프(UV-C)를 사용하기 때문에 에너지 비용이 많이 들고, OH라디칼 생성효율을 증대시키기 위해 철염을 촉매로 사용하기 때문에 발생하는 석영관의 스케일을 방지하기 위해

Wiper 시스템을 도입해야하는 단점이 있다. Fenton 산화 시스템의 경우 과산화수소와 2가의 철 이온이 반응하여 OH라디칼을 발생시켜 유기물질을 제거하는 공정으로 반응 촉매로 사용되는 철에 의한 수산화물 형태의 슬러지가 다량으로 발생하여 처리비용이 높아지고, 처리효율을 향상시키기 위한 UV 또는 Visible Light를 추가한 UV/Fenton 시스템이 요구된다.

최근에 많은 관심을 끌고 있는 UV/TiO<sub>2</sub> 시스템의 경우는 TiO<sub>2</sub> 광촉매를 이용한 광산화 기술로 저렴한 비용 및 인체의 무해성, 살균 및 독소제거 능력 탁월, 환경호르몬 등 각종 유기화합물의 완벽한 분해능력, 공정의 안정성(부산물 및 슬러지를 생성하지 않음) 그리고 지속적인 내구성 등의 많은 장점을 가지고 있기 때문에<sup>[5]</sup> 광촉매를 이용한 수처리 기술에 대한 기술동향 및 향후전망에 대해 서술하고자 한다.

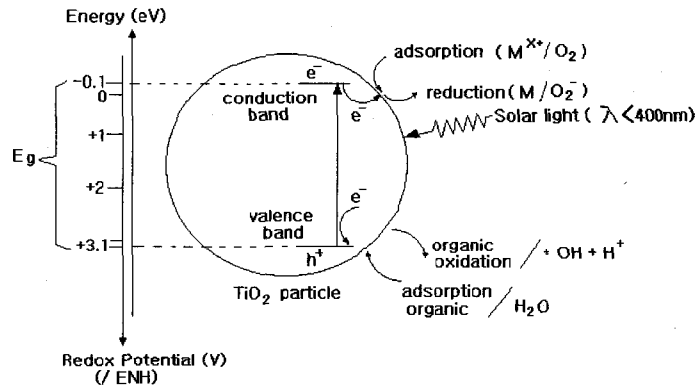
## 2. 광촉매 반응의 기초

### 2.1 광촉매 반응 원리

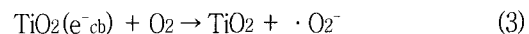
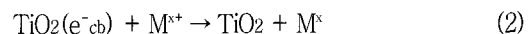
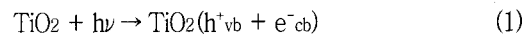
광촉매는 光에너지를 받아 활성화되면서 전자를 방출하거나 정공을 만들어 광촉매 물질의 표면에서 유기오염물질을 산화시키거나 일반 산화제 보다 훨씬 강력한 산화력을 지니고 있는 OH라디칼(·OH : Hydroxyl radical)을 생성하여 오염물질을 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)와 물(H<sub>2</sub>O)로 산화 분해시키는 역할을 한다. 여러 광촉매 중 가장 효과가 우수한 것으로 알려진 TiO<sub>2</sub>의 경우 그림 1에서 보는 바와 같이 bandgap 에너지(약 3.2eV) 이상의 에너지를 가진 빛(태양광의 파장으로 볼 때 400 nm 이하의 자외선에 해당)이 조사되면 30,000℃의 가온효과와 유사한 작용이 발생함에 따라 가전자대(valence band)의 전자(e<sup>-</sup>)가 여기(excite)되어 전도대(conduction band)로 전이되고, 가전자대에는 정공(h<sup>+</sup>)이

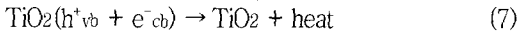
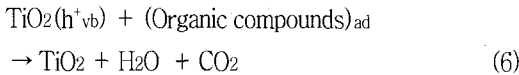
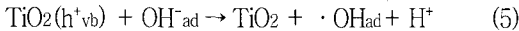
생성된다. 이때 생성된 가전자대의 정공은 TiO<sub>2</sub> 표면에 있는 물이나 OH<sup>-</sup>등과 반응하여 OH 라디칼을 생성하고, 전도대의 전자는 산소(O<sub>2</sub>)와 반응하여 superoxide 라디칼(·O<sub>2</sub><sup>-</sup>)을 생성한다. 발생된 OH 라디칼과 superoxide 라디칼은 강력한 산화제로써 TiO<sub>2</sub> 표면에 흡착된 유기오염물질을 물(H<sub>2</sub>O)과 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)로 분해하며, 중금속은 전자와의 반응에 의해 환원시킴으로써 유기오염물질과 중금속을 동시에 제거할 수 있는 최첨단의 고도산화 처리기법이다.<sup>[6],[7]</sup>

그림 1. TiO<sub>2</sub>에 의한 광촉매 반응원리



광촉매 반응은 식 (1)에서 보는 바와 같이 TiO<sub>2</sub> 촉매가 빛에너지를 흡수하여 전자와 정공을 발생시키고, 전자는 물 속의 용존산화 반응하여 식 (3)과 같이 과산화이온(superoxidizeradical)을 형성한다. TiO<sub>2</sub> 표면에 생성된 정공에서는 식 (4) 및 (5)와 같이 물분자 또는 용존된 수산화이온과 반응하여 OH라디칼을 형성하여 식 (6)과 같이 유기물질을 물(H<sub>2</sub>O)나 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)로 산화·분해한다.

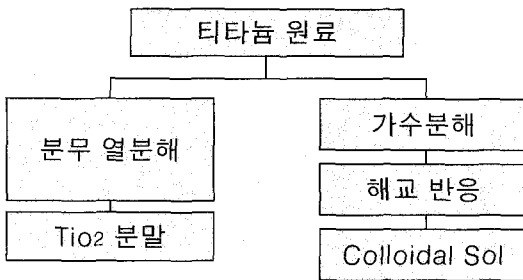




## 2.2 광촉매 제조

현재 광촉매를 이용한 수처리 시스템에서 사용하는 광촉매의 경우 분말상과 고정상으로 나누어 사용하고 있다. 광촉매 반응에 사용되는 광촉매는 그림 2에서 보는 바와 같이 티타늄을 열분해 과정을 거쳐 TiO<sub>2</sub> 광촉매 분말 형태로 제조하여 사용하거나 박막형태로 고정화시키기 위해 티타늄 원료를 가수분해, 해교반응 과정을 거쳐 콜로이드(colloid) 졸(sol) 형태로 제조하여 사용된다.

그림2. 광촉매 제조 방법



TiO<sub>2</sub> 분말은 일반적으로 TiCl<sub>4</sub>나 Ti(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>를 열분해 공정을 통하여 제조하는데, 특히, 최근에는 나노 사이즈 이산화티탄에 대한 관심이 집중되면서 분무 열분해법에 의한 나노 사이즈의 이산화티탄 입자 제조가 큰 관심을 모으고 있다. 그러나 이러한 분무 열분해법은 부산물인 염소가스나 이산화황 등에 의한 대기오염물질 발생으로 인해 제조과정에 대한 많은 규제가 이루어지고 있다. 이러한 규제에 의해 최근에는 수상치환에 의해 염소가스나 이산화황을 포집하는 공정을 추가하므로써 TiO<sub>2</sub> 분말제조에 설비적 부담이 많이 늘고 있는 실정이다.

이에 반해 Sol-Gel법에 의한 이산화티탄 콜로이드 졸 제조는 정확한 제조 메커니즘이 밝혀지지 않았을 뿐만 아니라 많은 변수들로 인해 제조 과정상 많은 어려움이 있는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 알려진 Sol-Gel 법에서의 변수로는 물과 알콕사이드의 물비, 해교제의 종류, 해교제의 양, 반응온도와 반응 시간 등이 있다. 특히 티타늄 알콕사이드의 경우 가수분해 속도가 매우 빠르기 때문에 가수분해 속도 조절 및 제조된 졸의 입자크기 조절에 많은 어려움이 있는 것으로 알려져 있다.<sup>8)</sup>

## 3. 광촉매 반응과 기존 수처리 기술의 비교

생물학적처리, 응집 그리고 펜톤 산화의 기존 수처리방법과 광촉매 산화반응을 이용한 수처리 시스템의 장·단점을 표 1와 같이 정리할 수 있다. 표 2에서 보는 바와 같이 생물학적처리의 경우 이미 많은 연구가 진행되어 있어 그 공법의 신뢰성이 높은 반면 슬러지 발생량 및 처리효율의 안정적 측면과 운전관리의 전문성이 요구되는 단점이 있고, 응집처리의 경우에는 처리 대상의 효율이 높은 반면 약품에 의한 슬러지 발생량이 많으며, 펜톤 산화의 경우에는 처리공정이 간단하고 관리가 용이하며 탈색처리에 효과적이지만 다량의 펜톤약품을 사용해야 하기 때문에 발생하는 다량의 철염 슬러지를 제거하기 위한 설비가 필요할 뿐만 아니라 고가의 펜톤 약품을 사용하기 때문에 운영비가 많이 든다는 단점이 있다.

이에 반해 광촉매 시스템의 경우 난분해성 폐수 처리가 가능하고 슬러지가 발생하지 않고, 운전 전문성이 필요하지 않으며, 적은 소요면적으로 기존 처리시설과 연계가 가능하지만 사용되는 UV 램프의 수명이 한정적이고, 광촉매의 사용형태가 분말일 경우 이를 다시 회수하기 위한 회수설비가 필요하다는 단점이 있다.

광촉매 반응을 이용한 수처리 기술은 사용되는 광촉매의 형태에 따라 분말과 박막의 고정상으로 대별할 수 있

표1. 기존 수처리방법과 광촉매시스템의 장·단점 비교

구분 방법	장 점	단 점
생물학적 처리	- 공법의 신뢰성이 높음 - 고부하처리 운전이 가능	- 처리효율의 안정적 확보가 어려움 - 슬러지 발생량 많음 - 운전관리에 전문성이 요구됨
응 집	- 처리 효율이 높음 - 소요 부지가 적음	- 슬러지 발생량이 과다 - 유지관리가 어려움
펜 톤	- 적용 범위가 넓음 - 처리공정이 간단하고 관리가 용이 - 착색 폐수의 효과적인 탈색	- 고가의 펜톤시약 사용으로 운영비 과다 - 펜톤시약으로 사용한 철염 제거설비 필요
광 촉 매	- 난분해성 폐수 처리 가능 - 운영비 및 설치비 저렴 - 슬러지가 발생하지 않아 처리비용 부담이 없음 - 비전분가 및 무인화 운전가능 - 간단한 전처리로 직접 오폐수 처리 가능 - 적은 소요면적으로 기존 처리시설과 연계 가능 - 수질 및 수량 변동시 일부 설비만의 선택적 운전가능 - 중수로의 이용가능	- UV-Lamp이용시 Lamp의 수명 한정 - 분말 사용시 광촉매 회수설비 필요

다. 최근까지 많이 이용되고 있는 방법은 분말형태인데 이것은 처리 효율이 높은 반면 앞서 말한 바와 같이 사용한 광촉매를 다시 회수하기 위한 회수장치가 반드시 필요하지만 고정상의 광촉매를 이용할 경우 회수장치가 필요 없으므로 경제적이긴 하나 분말 사용시보다 효율이 낮다는 단점이 있다. 분말 광촉매를 활용하는 수평 파이프형 반응장치의 경우 기존 캐나다 P사의 기술을 국내에서 많이 활용하고 있으며, 국내 T사의 산화장치는 수직 파이프형 반응기로 내부 Baffle에 의한 폐수의 격렬한 혼합에 따른 효율 향상 및 중압램프 사용에 따른 자외선의 접촉면적을 향상시키는 방법이 개발되었지만 모두 분말을 회수해야 하는 단점이 있다.

최근 이러한 분말 회수 문제와 효율향상이라는 두 가지 문제점을 해결하기 위한 많은 연구가 이루어져 국내 E사의 경우 고정상 광촉매를 활용하는 기술이 상당 부분 축적되어 있으며, 최근 국내의 많은 기업들이 이에 관심을 갖고 투자가 지속적으로 이루어져 광촉매를 이용한 수처리 기술 향상이 매우 긍정적인 방향으로 발전하고

있다. 또한 광촉매 반응을 이용한 수처리 기술은 어떤 광원을 사용하는가에 따라 인공의 UV-Lamp를 사용하는 방법과 태양광을 이용하는 방법이 있다. UV-Lamp를 사용할 경우 적은 소요면적으로 처리효율을 확보할 수 있지만 수명이 한정적인 반면 태양광은 무한한 에너지원을 활용할 수 있어 전력비가 절감되기는 하나 많은 소요부지가 요구되고, 우기 및 야간시 처리효율의 확보가 어렵다는 단점이 있다. 따라서 최근에 이 두 방식의 장점을 고려한 UV/태양광 시스템 개발이 활발히 진행되고 있으며 국내 E사에서는 정수처리를 위한 UV/태양광 정수처리 시스템이 최종 개발완료 단계 상태이다. 위에서 설명한 광촉매 반응에 사용되는 광촉매의 형태와 광원에 따른 장·단점 비교를 표 2에 나타내었다.

#### 4. 광촉매 반응을 이용한 수처리 기술의 적용

##### 4.1 UV를 이용한 분말형 광촉매 시스템

표2. 광촉매 형태 및 광원에 따른 광촉매 반응의 비교

방법		구분	장 점	단 점
P O W D E R	UV-LAMP		- 적은 소요부지로 처리효율 확보 용이	- UV-LAMP의 수명한정 - TiO <sub>2</sub> 분말 회수장치가 필요
	SOLAR LIGHT		- UV-LAMP의 전력비 절감	- 많은 소요부지의 요구 - 우기 및 야간의 적정 처리효율 확보의 어려움 - TiO <sub>2</sub> 분말 회수가 필요
F I X E D	UV-LAMP		- TiO <sub>2</sub> 분말 회수 불필요 및 설치비 절감 - 적은 소요부지로 처리효율 확보 용이	- UV-LAMP의 수명한정
	SOLAR LIGHT		- UV-LAMP의 전력비 절감 - TiO <sub>2</sub> 분말 회수 불필요 및 설치비 절감	- 많은 소요부지의 요구 - 우기 및 야간의 적정 처리효율 확보의 어려움
	UV-LAMP + SOLAR LIGHT		- TiO <sub>2</sub> 분말 회수 불필요 및 설치비 절감 - UV-LAMP의 전력비 절감	- 많은 소요부지의 요구

분말형 광촉매를 이용한 수처리 시스템 중 캐나다 P사의 Photo-cat.을 그림 3에 나타내었고, 국내 B사의 광촉매 산화 장치를 그림 4에 나타내었다. 그림 3, 4에서

그림3. 캐나다 P사의 광촉매 반응장치

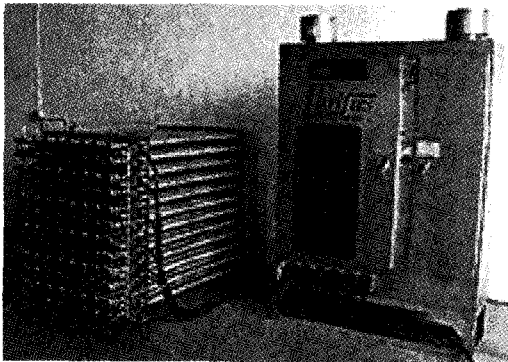
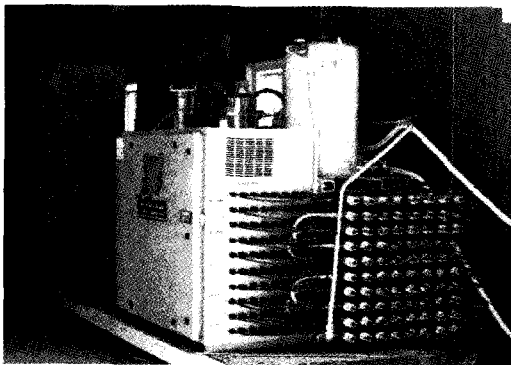
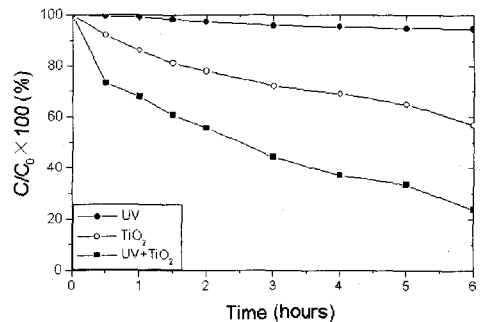


그림4. 국내 B사의 광촉매 반응장치



보는 바와 같이 UV를 이용한 분말형 광촉매 산화장치는 수평 반응기로 분말형 광촉매를 슬러리 형태로 반응기에 원폐수와 함께 유입되어 광촉매 반응에 의한 수처리를 수행한 후 유출수로부터 광촉매와 처리수를 분리하고, 광촉매를 회수하기 위한 회수장치가 반드시 필요하다. 그림 5에는 이러한 분말형 광촉매 반응을 이용하여 THM 전구물질의 대부분을 차지하는 Humic acid의 제거를 나타낸 것으로 UV에 의한 Humic acid의 광분해, TiO<sub>2</sub>에 의한 흡착 그리고 UV/TiO<sub>2</sub>에 의한 광촉매 반응을 비교한 것으로 6시간 동안 UV를 조사하여 광분해한 결과 5.6% 제거율이 나타났고, TiO<sub>2</sub>에 의한 흡착은 43.4%의 제거율이 나타났으며, UV/TiO<sub>2</sub> 광촉매 반응의 경우에는 76.2%의 제거율이 나타났다. 이러한

그림 5. 분말형 광촉매 반응에 의한 Humic acid의 제거



결과에서 보는 바와 같이 분말형 광촉매 시스템을 이용한 UV/TiO<sub>2</sub> 광촉매 반응이 Humic acid를 제거하는데 있어 매우 효과적이라는 것이 국내의 논문에도 잘 나타나 있다.<sup>[9]</sup>

#### 4.2 태양광을 이용한 분말형 광촉매 시스템

태양광 광촉매 반응 시스템의 구성을 그림 6에 나타내었다.<sup>[10]</sup> 그림 7에는 태양광 광촉매 시스템을 이용하여 맑은날과 흐린날의 EDTA와 TCE의 제거한 결과를 나타내었다.

그림 6. 태양광 광촉매 반응 시스템 구성도

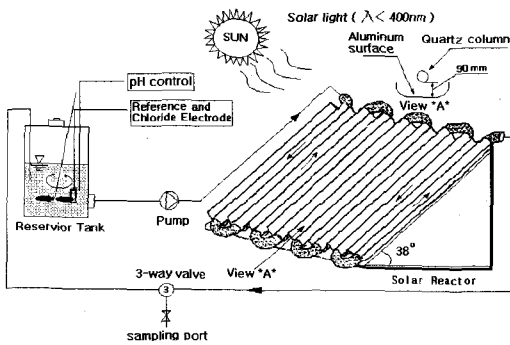
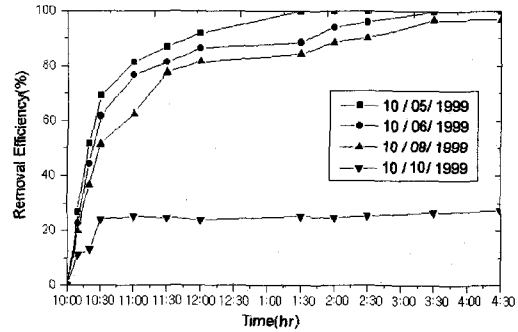


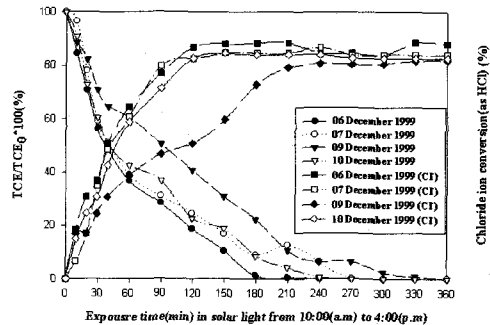
그림 7의 (a)에서 보는 바와 같이 10월 5, 6, 8일의 경우는 맑은날로 시간이 지나면서 EDTA가 대부분 제거된 반면, 10일은 흐린날로 시간이 경과하여도 맑은날에 비해 EDTA제거율이 현저하게 떨어지는 것을 알 수 있으며, (b)에서 보는 바와 같이 12월 6, 7, 10일의 경우에는 맑은날로 반응시간 180~270min에서 TCE의 제거가 완전히 이루어진 반면 12월 9일은 6, 7, 10일에 비해 상대적으로 흐린 날씨로 반응시간 360min에서 TCE가 완전하게 제거되었다. 이러한 결과로 보아 맑은날에 태양광을 이용할 경우 광촉매 반응이 EDTA 및 TCE 등의 유기물제거에 매우 효과적임을 알 수 있다.<sup>[11]</sup> 무한한 에너지원인 태양광을 이용하여 광촉매 시스템을 구성할 경우 인공의 UV Lamp를 사용하는 것에 비

해 매우 경제적이긴 하나 필요 소오부지가 넓고 우기 및 야간시 안정적인 처리효율을 기대할 수 없다는 단점을 극복할 수 있는 추가적인 연구가 계속 이루어져야 할 것이다.

그림 7. 태양광 광촉매 반응에 의한 EDTA와 TCE의 제거



(a) EDTA



(b) TCE

#### 4.3 UV를 이용한 고정상 광촉매 시스템

현재 분말형 광촉매 수처리 기술의 가장 큰 단점인 광촉매 회수문제를 해결하기 위한 많은 연구가 기업 및 연구소 등에서 이루어지고 있으며, 또한 이에 대한 논문도 많이 발표되고 있다.<sup>[11], [12]</sup> 최근 이러한 분말회수 문제를 해결하기 위한 연구의 결실로 국내의 E사에서 그림 8과 같은 UV를 이용한 고정상 광촉매 반응장치를 개발하였다. 그림 8에서 보는 바와 같이 광촉매를 Bead에 박막 형태로 코팅하여 분말회수의 문제점을 해결하였고, 산기관에 의해 반응조내 완전혼합 및 UV Lamp의 스케일

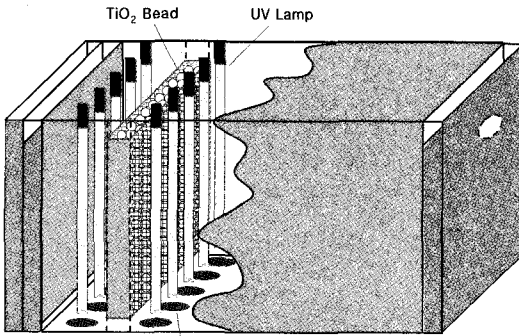
문제도 해결하였다.

국내 E사의 UV를 이용한 고정상 광촉매 시스템을 이용하여 생활하수, 오수, 난분해성 폐수, 염색 및 축산폐수에 적용한 결과를 표 3에 나타내었다. 각종폐수의

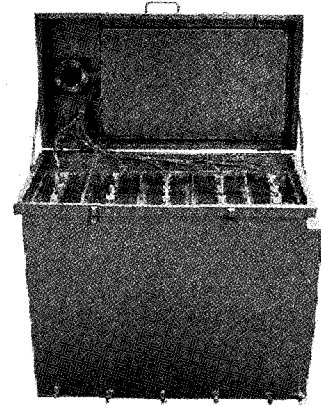
COD 및 BOD제거에 우수한 성능이 나타났고, 특히 색도제거에 탁월한 효과가 있음을 알 수 있다.

그림 8. 국내 E사의 UV를 이용한 고정상 광촉매 반응장치

그림 8. 국내 E사의 UV를 이용한 고정상 광촉매 반응장치



(a) 고정상 광촉매 반응장치 구성도



(b) 고정상 광촉매 반응장치

구분	COD			BOD			SS			색도			대상
	원수 (mg/L)	처리 수 (mg/L)	처리 효율 (%)	원수 (mg/L)	처리 수 (mg/L)	처리 효율 (%)	원수 (mg/L)	처리 수 (mg/L)	처리 효율 (%)	원수 (mg/L)	처리 수 (mg/L)	처리 효율 (%)	
생활하수	60	7.9	87	80	5	94	100	9	91				T시 1차 침전지 배출수
생활오수	64	10	83	80	3	96	30	5	83				P시 J아파트 최종방류수
염색 폐수	158	13	92							1,950	12	99	S시 염색공장폐수
난분해성폐수	1,300	50	96										P시 고무공장폐수
축산 폐수	1,864	85	95	2,300	80	96	443	80	81	4,740	20	99	N시 축산폐수 1차 처리수

표 . UV를 이용한 고정상 광촉매 시스템 적용결과

### 5. 결론 및 향후전망

최근 많은 관심의 대상이 되고있는 고도산화기술 중 하나인 광촉매 산화반응을 이용한 수처리 기술은 앞에서 살펴본 바와 같이 분말이나 고정상 그리고, UV Lamp나 태양광 모두에서 난분해성 유기물 제거 및 색도 제거에 매우 효율적인 뿐만 아니라 그 활용범위가 매우 넓다는 것을 알 수 있었다.

그러나 현재까지의 광촉매 산화반응을 이용한 수처리 기술은 광촉매 분말 회수 및 고가의 UV Lamp를 사용하는 등의 몇 가지 해결되어야할 문제점이 남아있는 상태이다.

따라서 향후, 광촉매 산화반응의 적용시 기존의 분말 사용을 박막 형태의 광촉매 코팅으로 전환하고, 처리의 고효율화를 위한 금속 담지 광촉매 원료를 이용하는 광촉매 원료에 대한 추가 연구가 수반되어야 할 것이며,

UV Lamp 사용을 태양광 사용으로 전환하고, 우기 및 야간에도 적정 처리효율 확보를 위한 UV Lamp의 보조적으로 이용하는 광원이용에 대한 연구가 지속적으로 이루어진다면, 광촉매 산화반응은 기존 수처리시설과 연계한 고도산화처리, 난분해성 폐수의 유기물 및 색도 제거, 폐수의 재활용을 위한 중수도 시스템 및 바이러스와 환경호르몬 처리를 위한 정수시스템 등에서 기존의 수처리 기술을 상당부분 대체할 수 있을 것으로 판단된다.

참고 문헌

[1] 전희동, "TiO<sub>2</sub> 광촉매를 이용한 고도산화기술", J. of KSEE, Vol. 16, No. 7, pp. 809~818(1994)

[2] Sedlak, D. L. and Andren, A.W., "Oxidation of Chlorobenzene with Fenton's Reagent", Environ. Sci. Technol., Vol. 25, No. 4, pp. 777~782(1991)

[3] 강준원, 박훈수, 최광호, "이산화티타늄 광촉매에서의 광분해반응에 의한 유기물질 제거에 관한 연구", J. of KSEE, Vol. 17, No. 3, pp. 283~294(1995)

[4] Glaze, W. H. and Kang, J. W., "Description of a kinetic model for the oxidation of hazardous materials in aqueous media with ozone and hydrogen peroxide in a semi-batch reactor", Industrial & Engineering Chemistry Research, Vol. 28, No. 11, pp. 1573~1580(1989)

[5] 송경석, 조일형 외, "재사용을 위한 하수처리장 방류수의 고급산화처리", Kor. J. Env. Hlth. Soc., Vol. 26, No. 3, pp. 61~68(2000)

[6] Bahnemann, D., Bockelmann, D. and Goslich, R., "Mechanistic studies of water detoxification in illuminated TiO<sub>2</sub> suspensions", Solar Energy Materials, Vol. 24, pp. 564~583(1991)

[7] Blake, D. M., et. al., "Kinetic and mechanistic overview of TiO<sub>2</sub>-photocatalyzed oxidation reactions in aqueous solution", Solar Energy Materials, Vol. 24, pp. 584~593(1991)

[8] 엄성진, 최형수, 서성섭 외, "금속 알콕사이드 제조 및 응용연구", 한국과학기술연구원 연차보고서 (1991)

[9] 김현용, 조일형, 이홍근, "TiO<sub>2</sub> 이용한 Humic Acid의 광촉매분해에 대한 영향인자에 관한 연구", Kor. J. Env. Hlth. Soc., Vol. 25, No. 2, pp. 26~30(1999)

[10] 조일형, 김현용, 조경덕, "자외선 집중 방사시스템에서 태양광/TiO<sub>2</sub>를 이용한 TCE제거에 관한 연구", 대한환경공학회 2001 춘계 학술연구발표회 논문집 (II), pp. 107~108(2001)

[11] 김종향, 윤경준, 김병관, "TiO<sub>2</sub> 고정화 sea sand를 이용한 유기염소계 화합물의 광분해", J. of KSEE, Vol. 18, No. 7, pp. 879~888(1996)

[13] Tanaka, K., and Hisanaga, T., "Photocatalytic degradation of organochlorine compounds over TiO<sub>2</sub> supported in several materices", Denki Kagaku, Vol. 60, No. 2, pp. 107~111(1992)

