

UV/TiO₂/H₂O₂를 이용한 축산폐수처리에 대한 연구

A Study on the Swine Wastewater Treatment Using UV/TiO₂/H₂O₂

김창균* · 정호진**

Kim, Chang-Kyun · Chung, Ho-Jin

Abstract

This study was performed to provide basic information for evaluating the efficiency and applicable extent of photocatalysis for the treatment of swine wastewater. Acid area was more efficient than neutral and alkalic areas in wastewater treatment, and level of pH3 was the most effective and the treatment efficiency continually increased as the amount of photocatalyst was increased. When the photocatalyst was increased, TCOD_{Mn} was removed faster than chromaticity. Pollutants were more effectively eliminated with both UV light illumination and TiO₂ than with either UV or TiO₂ alone. The removal efficiency was increased with the addition of H₂O₂ as an oxidant, but the removal efficiency was decreased with over an dosage of H₂O₂. The optimal dosage of H₂O₂ was 200 mg/L. Continuous injection of H₂O₂ was required for effective oxidation.

Keywords : Swine wastewater, Photocatalysis, UV-light, TiO₂, H₂O₂, Oxidant

요 지

본 연구는 축산폐수처리를 위해 광촉매의 적용가능성과 처리효율 및 범위를 실험하여 축산폐수처리에 대한 기초 자료로 제시하고자 한다. 축산폐수처리에 대한 광촉매양의 증가는 높은 처리효율을 나타냈으며 알칼리 영역에서 보다 산성영역 특히 pH3에서 축산폐수처리 효과는 우수하게 나타났다. 또한 광촉매양의 증가에 따라 색도 보다는 TCOD_{Mn}의 제거가 빠르게 이루어 졌다. UV 또는 TiO₂를 단독으로 사용하여 폐수처리를 하였을 때 보다 UV/TiO₂를 함께 적용하였을 때가 처리효율은 우수하게 나타났으며 산화제로 과산화수소를 주입하였을 때 처리효율은 UV/TiO₂만을 적용하였을 때 보다 처리효율이 우수하게 나타났다. 본 실험에서의 과산화수소 적정 주입량은 200 mg/L이며 과산화수소 적정주입량이 보다 많이 주입되었을 때는 처리효율이 떨어지는 것으로 나타났다. 또한 과산화수소의 주입량은 실험 시 계속적으로 주입이 되어야 높은 처리효율을 얻을 수 있었다.

핵심용어 : 축산폐수, 광촉매, UV램프, 이산화티타늄, 과산화수소, 산화제

1. 서 론

최근 급격하게 산업이 발달함에 따라 환경오염문제는 갈수록 심각해지고 있다. 그리고 호소의 부영양화는 축산농가에서 발생하는 폐수에 의하여 주로 발생됨으로 이에 대한 특별한 관리가 절실히 요구된다. 특히 양돈농가에서 발생하는 폐수의 농도는 대체적으로 BOD 1,500-5,000 mg/L, SS 4,000 mg/L, COD_{Cr} 4,000-9,300 mg/L, T-N 320-730 mg/L, T-P 178-508 mg/L로 조사되고 있다(배우근 등, 2001). 이러한 축산폐수는 다른 오염원에 비해 발생량은 적으나, 수질오염 부하량에는 크게 영향을 주게 된다.

또한, 부영양화의 원인물질이 되는 질소·인의 주요한 비점오염원이지만 이에 대한 관리는 제대로 되지 않은 실정이다. 수질오염은 오염원이 다양해지고 계속 새로운 오염물질이 생성됨으로 전형적인 수처리 방법으로는 한계에 부딪히고 있다.

일반적인 처리공정으로는 화학적 처리, 생물학적 처리, 오존산화법 및 자외선과 오존을 함께 사용하는 방법 등이 있다.

이러한 기존의 수처리 기술들은 2차 오염물질의 생성이라는 공통적인 문제점을 안고 있으며 이런 문제점들로 인하여 기존의 수처리 방법을 대체할 수 있는 새로운 수처리 기술이 요구된다.

새로운 기술로서 최근 많이 연구되고 있는 광촉매에 의한 수처리 기술은 폐수로부터 물질을 직접 제거하는 경제적인 공정이며, 온도의 영향을 거의 받지 않는 등 처리조건에 대한 제약은 거의 없다. 또한, 내성 유기물의 분해가 용이하며 살균공정 등의 타공정에서 생성된 유기물의 분해도 가능하며 이외에도 상온 및 상압에서 처리가 가능하다는 것과 유해 유기물질을 ppb 수준으로 제거할 수 있고, 낮은 농도에서도 분해속도가 감소하지 않으므로 미량 유해물질의 제거에 적합하다는 것 등 많은 장점이 있다. 하지만 그 중에서

*계명대학교 대학원 토목공학과 박사과정(E-mail: kck3225@empal.com)

**정호진 · 계명대학교 공과대학 토목공학과 교수(E-mail: hjc@kmu.ac.kr)

도 2차 오염물질의 생성이 없는 것이 가장 큰 장점이라 할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 고농도 축산폐수인 돈사폐수를 UV/TiO₂ 촉매를 사용하여 광분해시키는 반응에 대해 조사하였으며, 이에 필요한 촉매의 양과 H₂O₂ 및 pH의 변화에 따라 광분해 반응을 연구하였다. 이를 통하여 적절한 축산폐수처리 시스템을 구축하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서 이용한 폐수처리장치는 (주)이앤비코리아에서 개발한 장비이며 석영관으로 구성된 자외선램프, 공기펌프, 산기관, 광촉매볼((주)이앤비코리아)로 Fig. 1과 같이 구성된 가로, 세로, 높이 150×150×600 mm의 사각 스텐레스 회분식 반응기이다.

본 연구에서 사용한 UV-Lamp는 최대 6개를 폐수처리 장치에 설치하여 광촉매에 직접 자외선을 쬐어 줄 수 있도록 하여 광효율을 높였다. UV-Lamp는 254 nm의 UV-C파장으로 직경 25 mm, 길이290 mm인 16W UV-Lamp(Sankyo Denki Co.)를 사용하였으며 광촉매에 도달하는 빛의 세기는 6.3 mW/cm²로 측정되었다.

본 연구에서 사용된 회분식 반응장치(용량 10L)는 직접 제작하였으며 광분해 반응기(16W×6)를 내부에 설치하였다. 광촉매를 이용한 수처리에는 UV-Lamp를 사용하기 때문에 폐수내 SS의 제거가 우선 이루어져야 한다. 이는 SS가 너무 높으면 UV-Lamp에서 조사되는 빛이 광촉매 볼까지 투

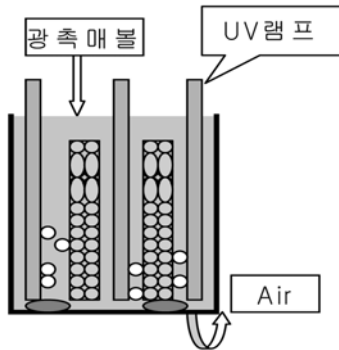


Fig. 1 Schematic diagram of apparatus for the wastewater treatment.

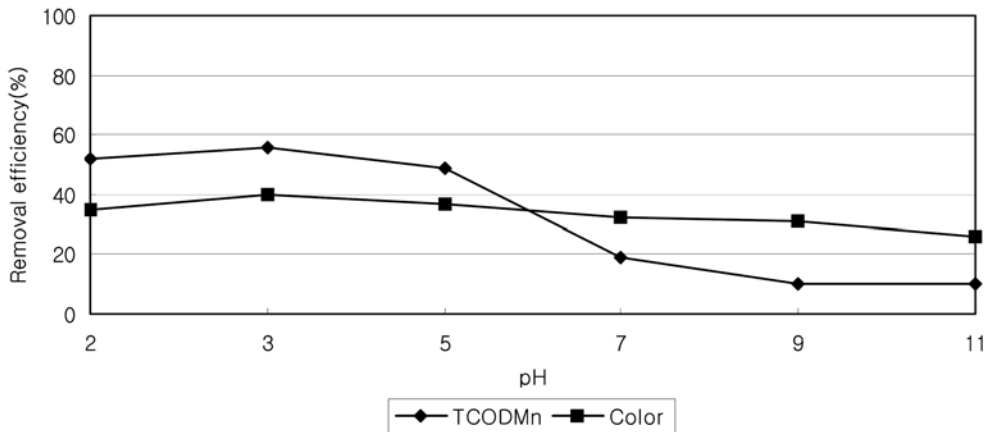


Fig. 2 Effect of pH Concentration on Photocatalysis of Swine wastewater.

Table 1. TCOD_{Mn}, Color and suspended solid of swine wastewater by green and coagulation.

| | raw water | after screen | after coagulation |
|---------------------------|-----------|--------------|-------------------|
| pH | 9.7 | 9.6 | 4 |
| TCOD _{Mn} (mg/L) | 8,500 | 7,000 | 550 |
| SS(mg/L) | 15,000 | 3,500 | 300 |
| 색도(도) | 5,700 | 5,000 | 1,800 |

과되기 어렵기 때문에 최대한 SS농도를 제거하여야 한다. 따라서 광촉매 활성실험에 앞서 고농도 축산폐수의 SS를 제거하기 위하여 축산폐수의 전처리 단계로 먼저 고액분리기를 이용하여 분과 뇨를 분리 하였다. 고액 분리된 축산폐수는 분은 퇴비로 사용을 하며 뇨는 저장조로 모아 H₂SO₄을 사용하여 pH를 약산성으로 조정 한 후 Al₂(SO₄)₃를 사용하여 응집하였다. 이에 대한 기본 자료는 Table 1에 정리하였다.

실험에 사용된 원수는 D시의 축산농가의 돈사폐수를 고액분리(SL-S10. (주)이앤비코리아)한 후 TiO₂ 광촉매 함유량의 변화와 H₂SO₄과 NaOH를 사용하여 pH를 변화시키면서 실험을 하였다. 또한, 폐수처리 장치의 하단에는 폐수의 완전 혼합 및 산화 보조역할을 위한 산기관을 장착하여 공기가 최대 10 L/min까지 주입할 수 있도록 하였다.

3. 실험결과

본 연구는 고농도의 유기물을 함유하고 있는 축산농가에서 배출한 축산폐수로서 UV/TiO₂를 이용하여 pH, 광촉매양의 변화, H₂O₂의 변화에 따른 처리 결과이다.

3.1 pH 변화의 영향

고도산화법(AOP)은 pH의 변화에 따라 분해효율이 차이가 나타난다. 즉, 유기물질이 과량으로 존재할 경우에는 pH 8 이상에서는 유기물질의 분해과정에서 생성되는 CO₂가 수중에서 HCO₃⁻, CO₃²⁻ 형태로 존재하여 OH라디칼을 소비하는 scavenger 역할을 하기 때문에 유기물질의 제거 효율이 저하되는 것으로 알려져 있다(경규석, 2001). 축산폐수 처리에 필요한 pH의 영향을 조사하기 위하여 pH를 각각 2, 3, 5,

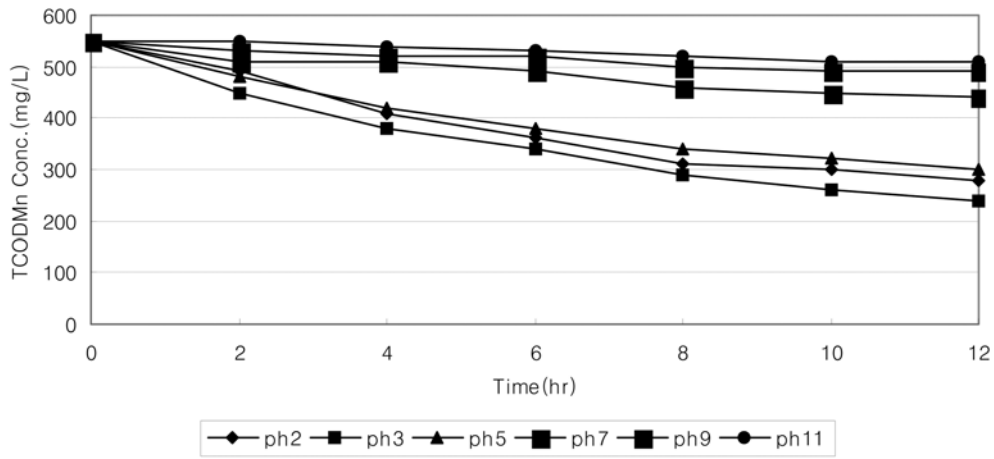


Fig. 3 Removal effect of TCOD_{Mn} Concentration according to pH variation.

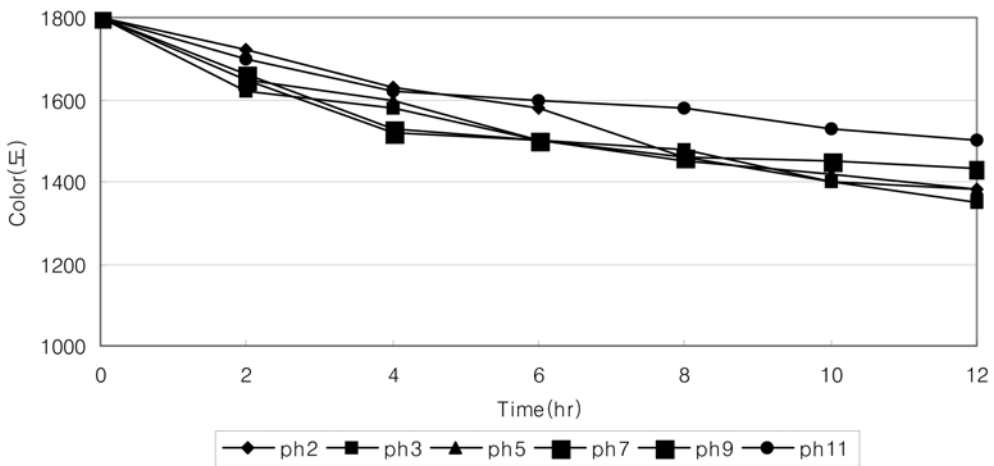


Fig. 4 Removal effect of Color according to pH variation.

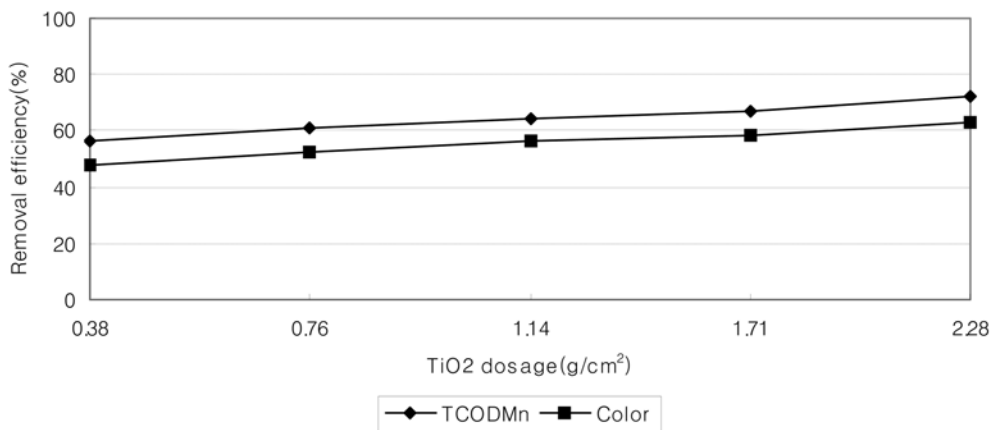


Fig. 5 Effect of TiO₂ Concentration on Photocatalysis of Swine wastewater.

7, 9, 11 등으로 조정하여 실험을 수행하였으며 그 결과는 Fig. 2~Fig. 4와 같다.

축산폐수의 pH영향에 대한 실험결과에 따르면 TCOD_{Mn}의 제거효율은 pH 2, 3, 5, 7, 9, 11의 경우에 각각 52, 56, 49, 19, 10, 10%로 나타났으며, 그리고 색도 제거효율은 각각 35, 40, 37, 32, 31, 26%로 나타났다. 본 실험의 결과로부터 축산폐수의 TCOD_{Mn}과 색도 처리를 위한 원수의 pH는 산성인 경우가 중성 또는 알칼리성인 경우보다 효과적임을 확인할 수 있으며 pH 3인 경우가 처리효율이 가장 우수함을 알 수 있었다.

이러한 실험결과에 대하여 TiO₂를 포함한 반도체 물질이

존재할 경우에는 원수의 pH가 광촉매의 표면전하에 중요한 영향을 끼치며, TiO₂는 비타상태의 표면전하인 pH 6.8을 기준으로 산성 조건이 중성이나 알칼리 조건보다 광촉매반응의 속도가 증가한다고 보고한 바 있으며, TiO₂와 같은 불균일 촉매를 이용한 광촉매반응의 경우에는 산성 pH조건에서 전자수용체와 전자주체와의 상호작용이 활발하여 광촉매반응의 활성이 촉진된다(김현용, 2003)고 판단된다.

3.2 광촉매 양의 영향

축산폐수 처리시 광촉매 양의 영향을 평가하기 위하여

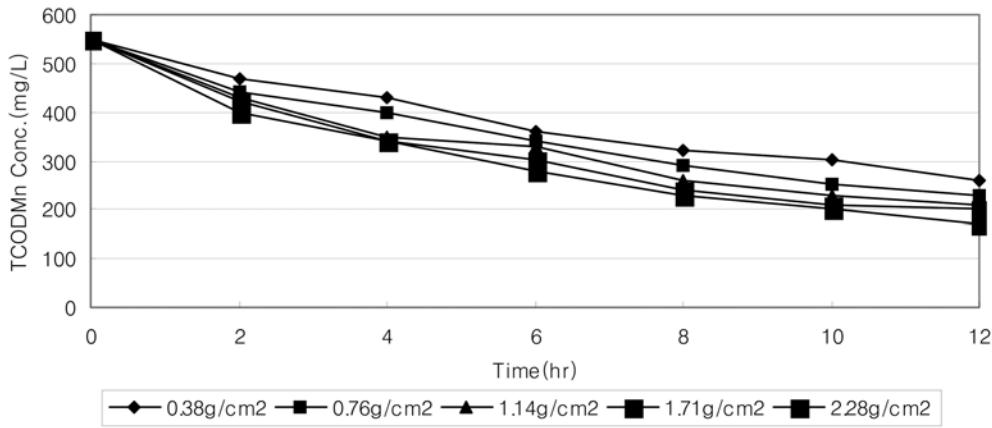


Fig. 6 Removal effect of TCOD_{Mn} Concentration according to TiO₂ dosage.

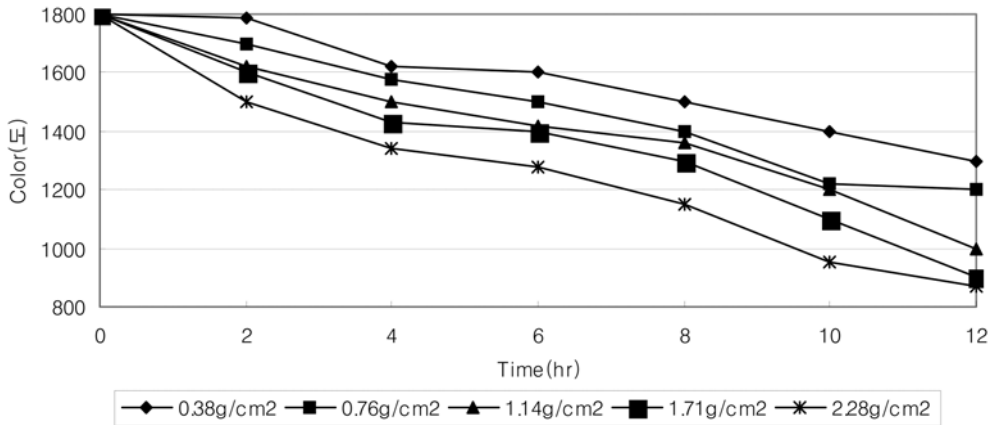


Fig. 7 Removal effect of Chromaticity according to TiO₂ dosage.

0.38, 0.76, 1.14, 1.71, 2.28 g/cm² 등으로 광촉매 양을 조정하여 실험을 수행하였다.

축산폐수의 광촉매 양의 영향에 대한 실험결과에 따르면 TCOD_{Mn}의 제거효율은 광촉매 양이 0.38, 0.76, 1.14, 1.71, 2.28 g/cm²인 경우에 각각 56, 61, 64, 67, 72%로 나타났으며 색도 제거효율은 48, 52, 56, 58, 63%로 나타났다.

Fig. 5~Fig. 7의 실험결과에서 광촉매 양이 증가할수록 TCOD_{Mn}과 색도의 처리효율이 선형적으로 향상됨을 알 수 있었다. 그러나 이와 같은 결과는 광촉매가 광에너지를 완전히 흡수할 수 있을 때까지는 광촉매 양이 증가하여도 반응속도도 증가하지만 그 이상의 광촉매 양에서는 광촉매 자체가 광촉매 표면에 도달하는 광에너지를 차단하는 효과(shielding effect)가 발생하기 때문에 반응속도가 둔화된다고 보고한(Matsunaga 등, 1995: Ameta 등, 1997: Huang 등, 1996)의 연구 결과와는 상반된다. 이러한 차이는 본 연구에서 광촉매를 박막형태로 이용하였기 때문인 것으로 판단되며, 고정화 광촉매를 이용한 광촉매반응의 적용시 광촉매 양의 증가에 따라 반응속도는 지속적으로 향상된다는 결론을 얻을 수 있었다.

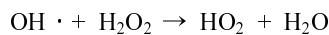
3.3 H₂O₂의 영향

축산폐수 처리시 산화보조제로서 H₂O₂를 사용하였다. 이에 따른 H₂O₂영향을 평가하기 위해서 본 실험은 원수 10L, 실험에서 도출된최적 pH 3으로 자외선 세기 37.8 mw/cm², TiO₂ 양은 2.28 g/cm², 공기주입량은 10 L/min, 반응시간 12

시간 등으로 조절하여 수행하였으며 일정시간 마다 시료를 채취하여 TCOD_{Mn}과 색도를 측정하였다.

H₂O₂의 영향을 평가하기 위해 0, 50, 100, 200, 300, 500 mg/L로 H₂O₂양을 조절하여 실험을 하여 그 결과로 Fig. 8~Fig. 10과 같다. H₂O₂의 영향에 대한 결과는 TCOD_{Mn}의 제거효율은 각각76,85,96,94%로 나타났으며 색도제거율은 각각 69,86,98,97%로 나타났다.

UV/TiO₂에 의한 유기물질 처리시 과산화수소는 OH 라디칼을 생성하여 촉매로 작용할 뿐만 아니라 촉매반응에 의하여 생성된 OH 라디칼과 반응하여 다음과 같이 OH 라디칼을 소비한다.



따라서, 과산화수소를 과량으로 주입하면 생성된 OH 라디칼을 소비하므로 유기물질의 분해효율을 저하시키는 원인이 될 수 있다.

Fig. 8~Fig. 10에서 나타난 결과에 의하면 UV/TiO₂만을 적용 하는 것 보다 H₂O₂를 주입함으로써 유기물질과 색도의 분해에 소요되는 반응시간을 단축시킬 수 있는 것으로 조사되었다.

과산화수소의 주입농도는 50~500 mg/L로 변화시켜서 주입하였으며 잔류하는 과산화수소 농도가 10 mg/L 이하가 될 경우 같은 농도로 재주입하여 실험을 수행하였다. 또한, 분해 특성을 조사한 결과 농도가 증가함에 따라 반응시간과 주입량이 비례적으로 증가하는 것으로 나타났다.

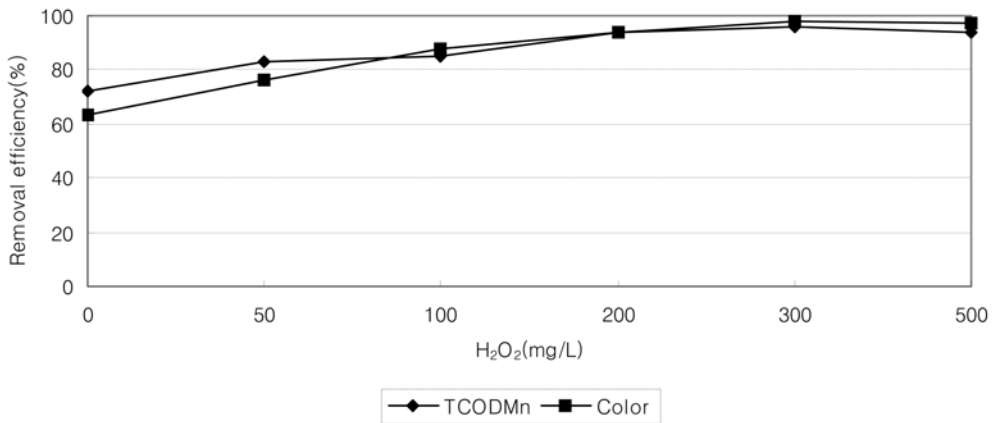


Fig. 8 Removal effect of TCOD_{Mn} and Color Concentration according to H₂O₂ dosage.

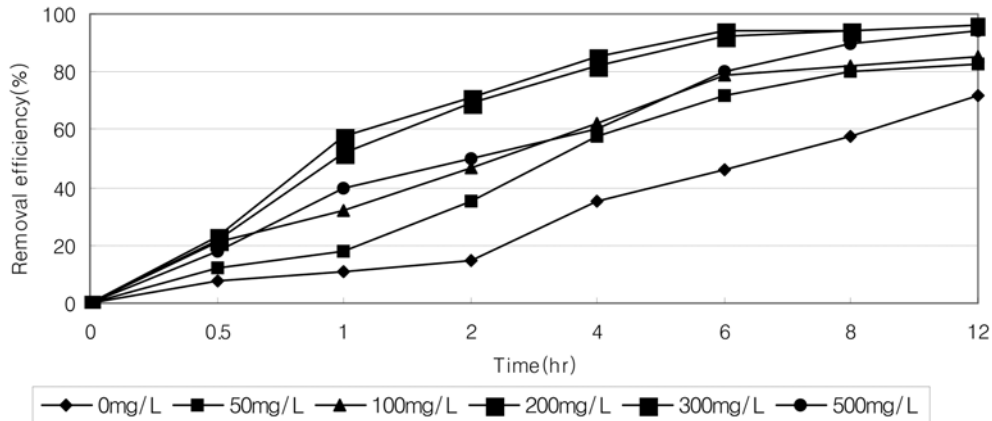


Fig. 9 Effect of H₂O₂ Concentration on Photocatalysis of TCOD_{Mn} of Swine wastewater.

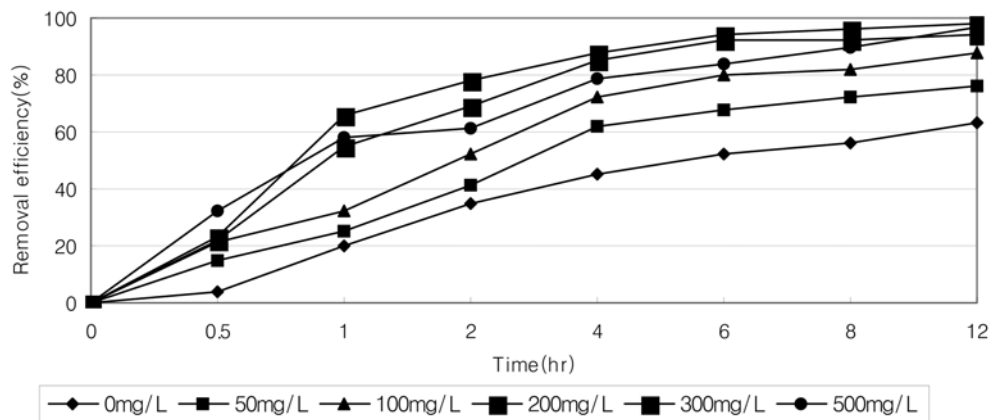


Fig. 10 Effect of H₂O₂ Concentration on Photocatalysis of Color of Swine wastewater.

Fig. 9와 Fig. 10에서 과산화수소의 농도가 200 mg/L 이상일 경우 TCOD_{Mn} 및 색도의 제거효율이 빠른시간에 나타났으며 500 mg/L을 주입하였을 경우 반응속도가 감소하는 것으로 조사되었다. 이와같이 과산화수소농도가 증가함에 따라 반응속도가 감소하는 이유는 과산화수소가 OH 라디칼 scavenger로 작용하였기 때문인 것(조순행 등, 1992)으로 판단된다. 따라서 본 실험에서는 과산화수소의 농도를 300 mg/L 이하로 주입을 하는 것이 유기물 및 색도 분해에 높은 효과를 얻을 수 있을 것이라 판단된다.

3.4 UV₂₅₄ 및 TiO₂광촉매와 UV/TiO₂ 산화의 비교

본 실험에서 축산폐수의 고농도 유기물질을 UV 조사만으로

도 제거되는 효율을 나타내었다. 반응시간 12시간 경과후 TCOD_{Mn} 제거율이 약 20% 나타내었다. Fig. 11~Fig. 12는 축산폐수 처리시 UV 단독 조사, TiO₂의 흡착, UV/TiO₂의 산화비교를 나타낸 것이다. 이에 따른 산화비교의 영향을 평가하기 위해서 본 실험은 원수 10L, 실험에서 도출된 최적 pH 3으로 조정하였으며 자외선 세기 37.8 mw/cm², TiO₂ 양은 2.28 g/cm², 공기주입량은 10 L/min, 반응시간 12시간 등으로 조절하여 수행하였으며 일정시간 마다 시료를 채취하여 TCOD_{Mn}과 색도를 측정하였다.

축산폐수에 대한 Fig. 11과 Fig. 12의 UV반응, TiO₂흡착, UV/TiO₂를 이용한 광촉매반응 등의 비교실험결과 TCOD_{Mn}의 제거효율이 각각 27, 18, 56%로 나타났으며, 색도의 제

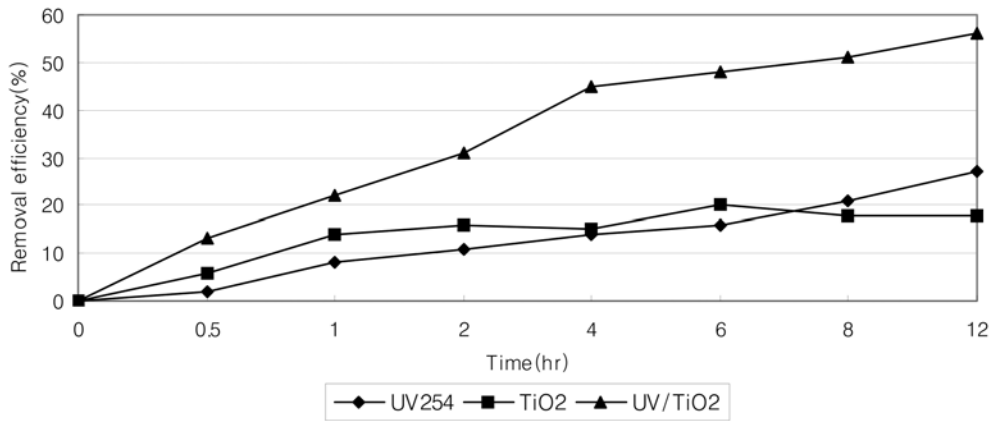


Fig. 11 Removal efficiency of TCOD_{Mn} by UV alone TiO₂ alone and TiO₂ with UV.

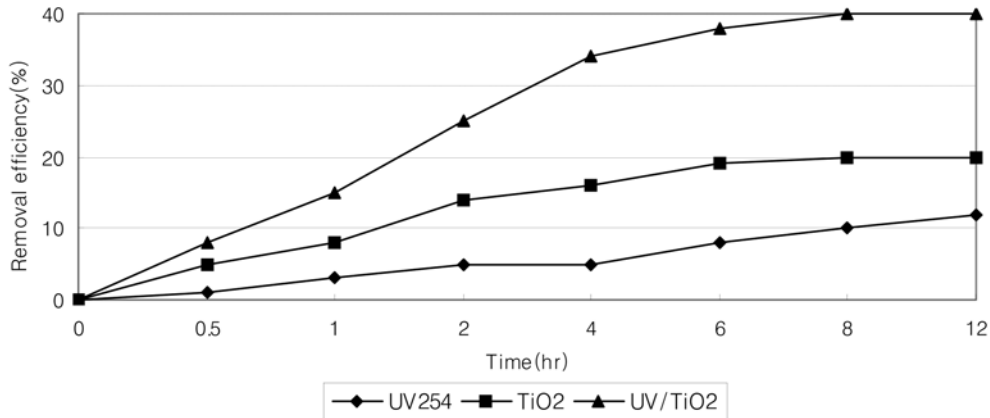


Fig. 12 Removal efficiency of Color by UV alone TiO₂ alone and TiO₂ with UV.

거울은 12, 20, 40%로 나타났다. 본 실험결과 축산폐수의 TCOD_{Mn}과 색도 처리시 UV/TiO₂를 이용한 광촉매반응이 UV반응 및 TiO₂흡착의 경우 보다 약 20~40%의 효율을 나타내었다. Fig. 11에서 UV 단독조사 하였을 때와 TiO₂만을 사용하였을 때를 비교하여 보면 체류시간이 8 hr 이후 부터는 UV 단독조사 하였을 때가 유기물제거 효율이 증가하였다. 이는 TiO₂가 유기물을 단지 흡착만으로 제거되는 일시적인 현상이라 판단이 된다. Fig. 12에서 체류시간 6 hr 이후 부터는 TiO₂에 의한 색도제거율이 약 15%로 거의 일정하다는 것을 알 수 있으며 UV 단독조사 하였을 경우 체류시간이 증가할수록 색도제거도 증가 하였다. 그러나 체류시간이 증가할수록 높은 제거율은 나타나지는 않았다. 위와 같이 TCOD_{Mn} 및 색도 제거를 위한 최적의 운전조건은 체류시간 8 hr에서 UV/TiO₂를 함께 운전한 경우로 나타났다.

4. 실험고찰

UV반응 및 TiO₂단독으로도 축산폐수의 유기물질 및 색도를 제거하는 효과를 나타내었다. 하지만 UV/TiO₂ 광촉매 반응과 비교하여 볼 때 TCOD_{Mn}과 색도 모두 제거효율 면에서는 큰 차이를 나타내었다.

광촉매 반응은 낮은 pH인 pH 3에서 TiO₂량 2.28 g/cm², 자외선세기 37.8 mw/cm²에서 최적의 조건을 형성하였다. TiO₂단독으로 사용하였을 때에는 반응시간 2 hr까지는 처리효율이 16%로 나타났으며 시간이 경과 할수록 처리효율은

낮아졌다.

또한, 6시간 이후에는 UV단독으로 반응하였을 때 보다 효율이 더 낮게 나타났으며 유기물 농도가 다시 상승하기도 했다. 이는 유기물질이 분해가 된 것이 아니라 TiO₂에 흡착이 되어 유기물이 제거된 것처럼 나타난 것이라 판단된다.

그리고 UV/TiO₂ 광촉매반응에서 H₂O₂의 주입량에 따라 유기물 및 색도의 분해가 빠른 시간에 일어났으며 12시간 경과후 약 97%이상 처리효율을 나타내었다.

본 실험에서의 pH가 알카리성 영역보다는 산성영역에서 높은 처리효율을 나타냈으며 광촉매 반응시 pH의 조건이 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다. 그리고 H₂O₂의 최적주입량은 200 mg/L 주입시 최적의 주입량으로 나타났으며 300 mg/L를 주입을 하였을 경우 반응시간이 경과할수록 처리효율이 낮게 나타났다.

이는 H₂O₂는 전자수용체로서의 능력을 가지므로 전자와 정공의 재결합을 막아 대상물질의 분해를 촉진하고 분해과정에서 OH라디칼을 생성함으로써 반응활성을 증가시키지만 일정수준 이상의 산화제 농도에서는 산화제 자체가 OH라디칼을 소모하는 반응이 일어남에 따라 반응활성의 증대가 이루어지지 않는다(이태규 등, 2000; Kumar 등, 1997)는 연구내용과 부합되는 결과를 얻을 수 있었다.

본 실험에 사용된 TiO₂는 박막형태로 제조된 고정상의 형태로 분말상태로 사용하였을 경우의 문제점인 회수처리장치가 필요 없으며 축산폐수 뿐만 아니라 하수, 오수의 살균 및 소독, 유기물제거에 활용할 수 있다. 또한 정수처리 부분

에서의 살균 및 소독, 유기물제거에 활용할 수 있으며 양식장 및 냉각탑의 살균 및 소독에 적용이 가능할 것이라 판단된다.

5. 결 론

본 연구는 회분식 광촉매 산화장치에 박막형태의 촉매를 고정상으로 사용하였기 때문에 TiO_2 가 분리되는 문제점은 발생되지 않았다. 또한 축산폐수의 색도제거에 매우 효과적이었다. 본 연구에서 얻어진 결과는 다음과 같다.

1. 광촉매반응을 이용한 축산폐수 처리시 pH 변화에 대한 영향은 산성영역이 중성 및 알칼리성 영역보다 효과적이며, 특히 pH3에서 처리효율이 가장 우수한 것으로 나타났다.
2. 광촉매 양의 변화에 대한 영향은 광촉매 양의 증가함에 따라 처리효율이 지속적으로 향상됨과 더불어 촉매가 고정상으로 되어 있어 분리되는 문제나 촉매를 회수하는 어려움은 발생되지 않았다.
3. 광촉매 양의 증가에 따라 색도의 제거율 보다 $TCOD_{Mn}$ 이 제거되는 속도가 빠르다는 것을 알수있다.
4. 광촉매를 이용한 축산폐수 처리는 안정적인 색도 제거 효율을 기대할 수 있고, 기존의 탈색 처리 시스템에 비해 매우 효과적이고 경제적인 기술이라 할 수 있다.
5. UV를 단독으로 사용하였을 시에도 유기물질 및 색도가 약 27%, 12%의 제거효율을 나타냈으며 TiO_2 를 단독으로 사용하였을 시에도 약 18%, 20%가 제거되는 효율을 나타내어 단독으로 사용하였을 시에도 충분히 분해가 가능하다는 것으로 조사되었다.
6. 최적 pH 조건에서 과산화수소의 주입량을 처리효율 면에

서 고려하였을 때 $TCOD_{Mn}$ 은 과산화수소 주입량 200mg/L에서, 색도는 300 mg/L에서 가장 높은 제거효율을 나타내었으며 과산화수소 주입량이 300 mg/L 이상을 주입하였을 때 제거효율이 감소되는 현상이 발생하였다.

참고문헌

- 경규석(2001) UV/ TiO_2 및 UV/ H_2O_2 에 의한 Oxalic Acid와 Citric Acid 의 분해 특성. 석사학위논문, 아주대학교.
- 김현용(2003) 폐수처리를 위한 광촉매 박막 제조 및 특성에 관한 연구. 박사학위논문, 서울대학교.
- 배우근, 고평범, 이용우, 이창호(2001) 단축질소제거공정을 이용한 양돈 폐수의 처리. 우리나라의 현안문제 : 축산폐수 문제해결을 위한 기술 및 정책심포지엄, pp. 39-47.
- 이태규, 주현규, 김종순, 윤우석(2000) 광촉매와 환경/에너지. *Catalysis*, 16(1), pp. 8-21.
- 조순행, 이수형(1992) 독성 및 난분해성 유기폐수의 처리기술 개발. *대한환경공학회논문집*, 대한환경공학회, 제14권 제2호, pp. 129-141.
- Ameta, P. Ameeta, R. Ameta, R.C., and Ameta, S.C. (1997) Use of Semiconductor oxides in the photocatalytic reaction of sodium hexanitrocobaltate(III). *Journal of Photochemistry and Photobiology A:Chem.*, 103, pp. 133-136.
- Huang, M., Tso, E., and Dnye, A.K. (1996) Removal of silver in photographic processing waste by TiO_2 -based photocatalysis. *Environ. Sci. Technol.*, 30(10), pp. 3084-3088.
- Kumar, S. and Davis, A.P. (1997) Heterogenous photocatalytic oxidation of nitrotoluenes, *Water. Environ. Res.*, 69(7), pp. 1238-1245.
- Matsunaga, T. and Okochi, M. (1995) TiO_2 -mediated photochemical disinfection of Escherichia coli using optical fibers. *Environ. Sci. Technol.*, 29(2), pp. 501-505.

(접수일:2006.2.7/심사일:2006.3.25/심사완료일:2006.3.25)