

재사용을 위한 하수처리장 방류수의 고급산화처리

송경석 · 조일형[†] · 심기석* · 정문호 · 이흥근 · 조경덕

서울대학교 보건대학원 환경보건학과

*우송공업대학 환경공업학과

Advanced Oxidation Processes of Secondary Effluent for Reuse

Kyoung Seok Song, Il Hyung Cho[†], Gi Seok Sung*, Moon Ho Chung

Hong Keun Lee and Kyung Duk Zoh

Dept. of Environmental Health Graduate School of Public Health, Seoul National University

*Dept. of Environmental Industry, Woo-Song Technical College

(Received 26 July 2000 ; Accepted 14 September 2000)

ABSTRACT

The use of photo-catalytic processes in pollution abatement and resource recovery has a significant economic importance. Therefore, the applications of photochemical oxidation of secondary effluent driven by UV, TiO₂, TiO₂/UV, H₂O₂/UV and TiO₂/H₂O₂/UV, have been investigated in order to treat the secondary effluent from municipal sewage. Various experimental parameters such as BOD, CODcr, Nurbidity, total P, and SPC were examined in each photo-catalytic reaction system. The results showed that the application of single oxidant such as UV, TiO₂ only has a minor effect on parameters reduction (CODcr, BOD, etc) to treat the secondary effluent, whereas the combinations of oxidants increase the removal efficiency. The best removal efficiency in every parameters was achieved by the combination of TiO₂, H₂O₂ and UV. It was also found that the optimum amount of TiO₂ for the treatment was 1 g/l to achieve water reuse standard. From the results, the photocatalytic reaction system can be an alternative as a post-treatment to treat the secondary effluent from municipal sewage.

Keywords : Photo-catalytic, TiO₂, UV, H₂O₂, Secondary effluent

I. 서 론

급속한 도시화, 생활수준향상 및 산업발전으로 물 사용량이 끊임없이 늘어나고 있어 앞으로 물 부족이 예상되고 있다. 최근 여러나라에서 나타나고 있는 물부족 현상은 인류의 건강과 위생에 대한 심각한 우려를 점점 증가시키고 있다. 개발도상국 중 80% 이상의 국가에서 부족한 물 공급으로 인하여 질병 발생율이 심각하게 증가하였다. 세계보건기구(WHO) 보고에 따르면 세계인구의 1/5인 12억 인구가 비위생적인 음용수를 사용하고 있고, 14억 인구는 위생적인 물 처리한 음용수를 이용하지 못하고 있으며, 세계 인구의 40% 이상이 물 부족 국가에서 살고 있다.^{1,2)} 우리 나라의 수자원 총량은 1267억 m³이며 이 중 하천수는 689억 m³(54%), 손

실량은 578 m(46%)이다. 또 내리는 비의 양은 연평균 1274 mm로 세계평균 750 mm보다 훨씬 많다. 그러나 이 물의 양을 인구수로 나눈 것이 바로 국민 한사람이 쓸 수 있는 몫이기 때문에 안심할 처지는 못된다. 국민 1인당 쓸 수 있는 물은 세계적인 평균(3만 4천 m³)의 10분의 1에 미치는 3천 m³에 지나지 않기 때문이다.³⁾

부족한 용수확보 방안으로 해수의 담수화와 댐건설 등 직접적 수원 확보 방법과 중수도 설치와 같은 간접적인 방법이 있다. 중수도 제도는 한번 사용한 물을 처리하여 수세식 화장실 용수, 청소용수, 살수용수, 세차용수 및 공업용수로 재이용하는 방법이며 다 정수장, 하수처리장 건설비와 처리비용을 줄일 수 있으며 하천의 수질오염을 저감하는 장점이 있다.^{3,4)}

화학적 산화는 일반적으로 도시하수를 생물학적으로 처리할 때 잘 처리되지 않는 질소, 인, 중금속 및 난분해성 유기물질을 제거할 수 있으며, 도수하수를 전처리함으로써 생물학적 처리를 증대시킬 수 있다. 특히 고급산화공정(AOPs)은 생물학적으로 처리할 수 없는 폐

[†]Corresponding author : School of Public Health, Seoul National University 28 YeonGun-Dong, Jongro-Gu, Seoul, Korea
Tel: 02-740-8881, Fax: 02-745-9104
E-mail: choil@snu.ac.kr

수의 성분이 복잡한 폐수에 선택적으로 적용이 가능하여 처리효율의 증가는 물론 물의 재사용 용도로 전환시켜 수자원확보를 가능하게 하였다.^{5,6)}

농촌의 용수로서 도시하수처리후의 물의 재사용은 특정 용도에 맞는 수질을 얻기 위해서 2차 유출수의 고도처리의 가능성에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있는바, 특히 고급산화법(AOPs)에 대한 관심이 증가되고 있다.^{7,8)} 고급산화공정에서 OH라디칼의 생성은 많은 유기물질을 효과적으로 파괴시켜 처리수를 감량화는 물론 물의 질적 향상을 가능케한다.

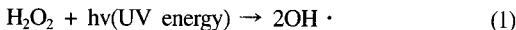
광촉매기술의 활용 분야는 크게 지하수와 오염된 상수원수의 고도 정수처리 분야와 폐수처리분야 2가지로 나눌 수 있다. 정수처리에는 미량 독성 유기물질의 제거, 이온 금속제거, 맛이나 냄새 유발물질의 제거, 미생물 살균, 발암성 물질인 THM의 제거 및 생성 방지 등을 목적으로 활용되며, 폐수처리에 있어서는 침출수, 도시하수 유출수처리, 염색폐수, 제지폐수, 염료폐수, 전자/반도체폐수, 석유화학폐수, 각종 화학약품폐수 등 독성 및 난분해성 유기물질 처리에 활용된다.⁹⁾

본 연구는 수자원확보 차원에서 하수처리장 방류수를 TiO₂ 광촉매산화공정으로 처리하여 중수도 시스템의 적용가능성을 검토하고 이 공정의 운전자료를 얻음 목적으로 수행하였다.

II. 고급산화공정(AOP)의 종류 및 기술개요

1. Homogeneous - UV/H₂O₂ system

과산화수소에 자외선을 조사시켜 OH Radical 발생시켜 유기물질을 제거하는 공정으로 다음과 같은 반응이 진행된다.¹⁰⁾

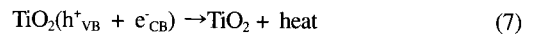
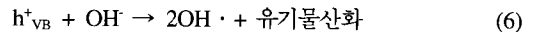
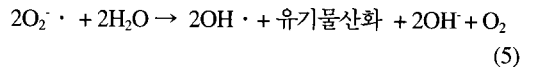
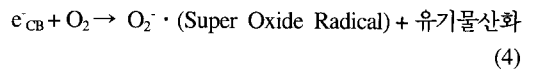
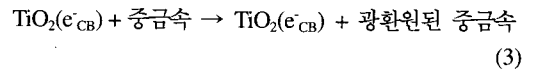
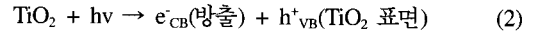


이 공정은 근자외선영역에서는 빛의 흡수능이 매우 낮으므로 보통파장 254 nm에서 방출하는 저압수은램프(UV-C)를 사용하기 때문에 에너지 비용이 많이 든다. 또한 OH Radical 생성효율을 증대시키기 위해 철염을 촉매로 사용하며 석영관에 철염의 스케일이 생성되는 Fouling현상을 방지하기 위해 Wiper 시스템이 도입된다.

2. Heterogeneous - UV/TiO₂ system

TiO₂ 광촉매원리는 반도체 성질을 갖고 있는 촉매인 TiO₂ 을 수중에 현탁시켜 UV Light를 조사시키면 식 (2)에 의해 에너지적으로 여기 되어 방출된 전자는 중

금속이온과 수중의 용존산소를 전기 화학적으로 흡착을 한 후 중금속이온을 광환원시키거나(식 (3)) 또는 산소와 반응하여 superoxide radical을 형성시켜(식 (4)), 유기물질을 분해시키고(식 (5)), 또한 TiO₂ 광촉매 표면의 정공에 의해 OH Radical이 생성된다(식 (6)). 이렇게 생성된 OH Radical에 의해서 유기물질은 분해된다(식 (7)).^{11,12)}



이 공정은 UV lamp를 UV-A($\lambda < 390 \text{ nm}$)를 사용함으로 대략 태양에너지의 약 5%를 사용할 수 있다. 문제점으로는 촉매인 TiO₂를 회수하여 재사용하기 위한 별도의 장치가 필요하다.

3. Fenton - 산화 system

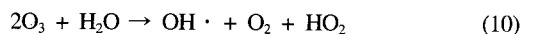
이 공정은 식 (8), (9)에 따라 과산화수소와 2가의 철이온이 반응하여 OH Radical



을 발생시켜 유기물질을 제거하는 공정이다.¹³⁾ 이 처리공정의 단점은 반응 촉매로 사용되는 철에 의해 수산화물 형태의 다량의 슬러지가 발생하여 처리비용이 많이 든다. 또한 처리 효율을 개선하기 위해 펜톤산화법에 UV 또는 Visible Light를 추가한 UV/Fenton 시스템 개발이 요구된다.

4. Ozone - 산화 system

높은 pH에서 오존은 OH Radical 발생시키면서 유기물을 분해시킨다.¹⁴⁾



이 공정의 문제점은 OH Radical 생성율이 낮으며, 오존은 일부 유기물과 반응이 느리거나, 어떤 유기물과

는 전혀 반응하지 않는 등 유기물과의 반응에서 선택적이며, 특히 독성가스로서 물에 대한 용해도가 낮다. 또한 오존발생기는 비교적 고가이며, 오존 누출에 대한 안전 문제가 있다.

III. 실험장치 및 방법

1. 시료

연구에 사용한 시료는 T 하수처리장에서 방류수를 채취하여 사용하였으며 방류수의 수질은 Table 1과 같다. 본 연구의 하수처리는 1999년 9월 12일부터 10월 22일까지 유출수를 채취하였으며, 원수의 특성상은 다음과 같다.

2. 실험방법

본 연구에서 Table 2의 중수도 처리시설 용도에 맞는 수질을 얻기 위하여 일반적으로 처리 대상이 되는 수질항목인 탁도, 유기물질(BO₅, COD_{Cr}, TOC), 총인, 수소이온농도, 총 세균 등을 Table 3의 분석방법에 따라 분석하였다.

Table 1. Characteristics of influent (T Secondary Effluent) used in this study (Unit : mg/l)

Items	Concentration	Items	Concentration
BOD	22.5	CN ⁻	ND
COD _{Cr}	27	Fe	0.013
Turbidity	6.28	Pb	0.061
TOC	28	Al	0.03
TSS	28.9	Mn	0.062
TP	2.73	Cu	0.004
PO ₄ -P	2.2	Zn	0.007
TKN	2.46	Hg	ND
NH ₃ -N	2.1	Ni	0.09
NO ₂ -N	0.53	Cd	0.057
NO ₃ -N	11.5	Ca	ND
Alkalinity	25	Total Cr	0.003
SPC	21400000~18000000 (CFU/ml)	AS	ND

Table 2. Reclaimed Water Criteria in Korea

중수도의 용도	수세식 화장실 사용	실수용수	조경용수
대장균 균수	< 10마리/ml	ND	ND
외관	이용자가 불쾌감을 느끼지 아니할 것	이용자가 불쾌감을 느끼지 아니할 것	이용자가 불쾌감을 느끼지 아니할 것
탁도	< 5도	< 5도	< 10도
BOD	< 10 mg/l	< 10 mg/l	< 10 mg/l
냄새	불쾌한 냄새가 없을 것	불쾌한 냄새가 없을 것	불쾌한 냄새가 없을 것
pH	pH 5.8~8.5	pH 5.8~8.5	pH 5.8~8.5

3. 실험장치

Fig. 1에 본 연구에서 사용한 TiO₂ 광촉매산화공정의 개략도를 나타내었다. 광촉매반응에 사용된 반응용량은 7l로 용액저장조의 반응용액은 정량펌프(Master Flex 7592-50, Cole-Parmer Instrument Co.)를 이용하여 반응기컬럼의 측면 하부로부터 상부로 이동하였으며, 반응기컬럼 유출부에서 나오는 반응용액은 3방 밸브(3-way valve)를 이용하여 시료 채취와 용액 저장조로의 이송이 가능하도록 하였고, 이중 반응기 내에서 자외선과 접촉하고 있는 부피는 약 1.88 l이다. 또한 사용 목

Table 3. Item and method for sample analysis

Items	Analytical Method
pH/ORP	Electrode(Ag/AgCl) Method(115PO, Istek Co.)
DO	Electrode Method(115PO, Istek Co.)
BOD ₅	Winkler Azide Modification Method(20, 5 day)
COD _{Cr}	Colorimetric Method(UV-1201, Shimadzu Co.)
TOC	TOC analyzer(TOC 5000A, Shimadzu Co.)
Turbidity (NTU)	Turbidity analyzer(HACH CO.)
SPC	MPN/100 ml
T-P	Standard Method(UV-1201, Shimadzu Co.)

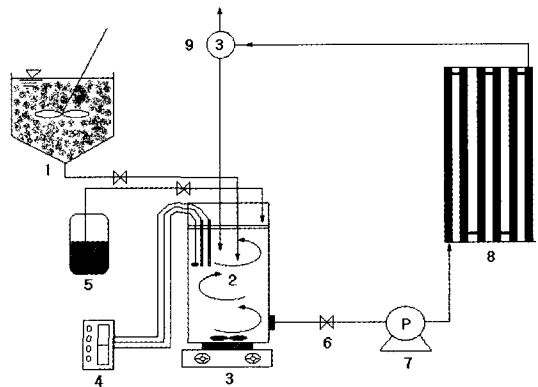


Fig. 1. Schematic diagram of Photocatalytic Reaction system used in the study.

Table 4. Operation Conditions and other Specifications of the photocatalytic system

Total volumn(batch volumn)	7 l
Actual contact Volumn(photocatalytic volumn)	1.88 l
UV wavelength(UV-B)	368 nm(BLB)
Volumetric flow rate(contact time)	4.7 l/min(17 sec)
Initial TiO ₂ dosage	0.25 g/l
Initial H ₂ O ₂ concentration	300 mg/l
Electric work for total system	0.64 kWh

적에 따라서 H₂O₂를 H₂O₂주입장치에서 일정량 투입하였다. 광촉매반응에 사용된 반응기컬럼은 용량이 0.47 l(20 mm(직경)×1500 mm(길이)×2 mm(두께))인 자외선이 투과 가능한 원형 석영(Quartz tube)의 관 4개를 설치하였으며, 반응기컬럼과 자외선램프 사이의 거리는 70 mm이었다. 광원은 315~400 nm의 파장영역과 368 nm에서 중심파장을 가지는 직경 32 mm, 길이 1200 mm인 40 W 자외선램프(Sankyo Electric Co., F40T10) 16개를 사용하였으며, 반응기컬럼 중앙에서 측정된 자외선램프 1개의 세기는 150 W/cm²(VLX-3W RADIOMETER, Cole Parmer Instrument Co)이었다. 자외선램프는 자외선이 외부로 반사되는 것을 차단하고 반응기컬럼 전 영역에 자외선이 균일하게 조사될 수 있도록 폭 600 mm, 길이 1700 mm, 높이 300 mm인 이크릴 자외선램프 고정관의 내벽에 고정하였다. 10 l 용량의 용액저장조는 상부를 개방하여 공기에 노출되도록 하였으며, 하단에는 교반기를 설치하여 반응용액의 균질상태를 유지하도록 하였다. 또한 Table 4는 TiO₂/H₂O₂/UV System으로 반응유량 4.7 l/min으로 광반응기에서 반응용액이 자외선을 조사받을 수 있는 용량은 약 1.88 l이고 자외선에 접촉될 수 있는 시간은 17초로 고정하였다.

IV. 결과 및 고찰

1. 촉매의 종류에 따른 처리 효과

(1) CODcr

여러 가지 강력한 산화제를 이용하여 OH 라디칼을 중간 생성물로 이용하여 수처리하는 기술인 고급산화법 중 자외선(UV)의 조사 실험, TiO₂에 의한 흡착 실험, TiO₂와 자외선(UV)을 이용한 광촉매 실험, 과산화수소(H₂O₂)에 자외선(UV)을 조사한 광분해 실험, 과산화수소와 TiO₂ 촉매제에 자외선을 조사한 실험 등을 각각 60분 동안 수행하였다. 순환식반응기에서 여러 가

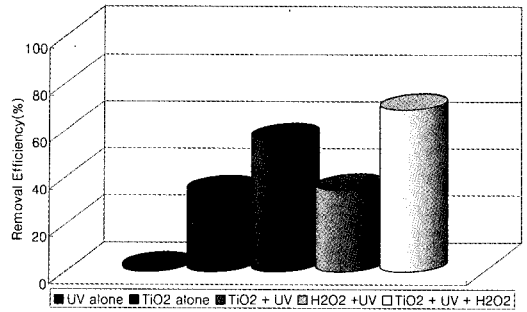


Fig. 2. Variation of CODcr of secondary effluent by UV alone, TiO₂ alone, and UV with TiO₂: (Initial CODcr = 28.3 mg/l, TiO₂ = 0.25 g/l, H₂O₂ = 300 mg/l, pH = 7.8, Column number = 4, light intensity = 2400 W/m²).

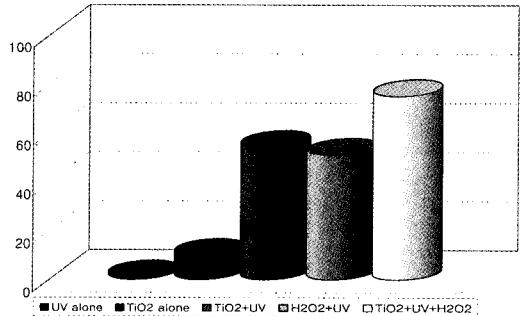


Fig. 3. Variation of BOD of secondary effluent by UV alone, TiO₂ alone, and UV with TiO₂: (Initial BOD = 22.5 mg/l, TiO₂ = 0.25 g/l, H₂O₂ = 300 mg/l, pH = 7.8, Column number = 4, light intensity = 2400 W/m²).

지 촉매의 처리공정을 이용한 하수처리수를 실험한 결과는 다음 Fig. 2와 같다.

Fig. 3에서 자외선만 조사된 경우에는 거의 제거율에 변화가 없었고, TiO₂를 첨가한 흡착 실험의 경우에는 반응시간 10분이내에 약 30% 제거되었고 그 후에는 시간에는 평형점에 도달하면서 90분에 33.8%가 제거되었다. TiO₂에 자외선을 조사한 광촉매 실험은 56.1%, 과산화수소에 자외선을 조사한 광분해 실험에서는 34.6%의 제거율을 나타냈으며, 마지막으로 산화제인 과산화수소와 TiO₂를 첨가시키고 자외선을 조사시킨 실험에서는 68.8%가 제거되었다.

본 연구에서 TiO₂만 첨가시킨 촉매흡착을 제외한 광촉매/과산화수소/자외선 공정에서 촉매반응 실험에서 가장 강력한 산화력을 가짐으로써 처리효율면에서 가장 광활성이 뛰어난 것으로 나타났다. 그 이유는 광촉매/자외선 공정에서 발생된 강력한 OH radical 및 superoxide radical 등의 강력한 산화제뿐만 아니라 전자를 소모함

으로써 전자-전공 재결합을 막아 대상물질의 산화반응이 잘 진행되게 하는 역할을 하고 직접 사용되는 OH radical을 생성하므로, 반응활성이 더욱 증가된 것으로 판단된다.

(2) BOD

Fig. 3은 BOD의 제거율을 나타내었다. 자외선만 조사한 경우 제거율에 큰 변화가 없었으며, TiO₂를 첨가한 실험은 9.8%로 제거율이 큰 변화가 없었으나, TiO₂와 자외선을 포함한 광촉매 실험에서는 제거율이 54%로 향상되었다. 과산화수소에 자외선을 조사한 광분해 실험에서는 51%로 광촉매실험과 비슷한 제거율을 나타냈다. 마지막으로 TiO₂ 촉매와 과산화수소를 첨가시켜 자외선을 조사한 경우 75%로 제거율이 증가하였다.

(3) 탁도

Fig. 4에 탁도의 제거율을 나타내었다. 자외선만 조사한 경우 제거율의 변화가 없었으며, TiO₂를 첨가한 흡

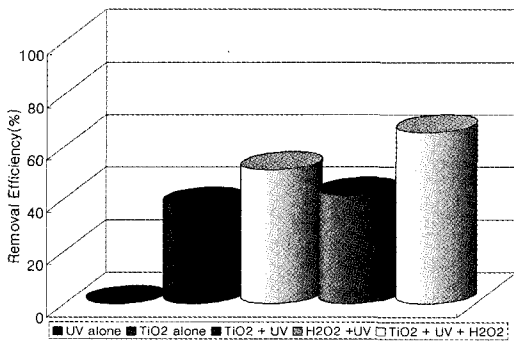


Fig. 4. Variation of Nurbidity of secondary effluent by UV alone, TiO₂ alone, and UV with TiO₂: (Initial Turbidity = 6.28 mg/l, TiO₂ = 0.25 g/l, H₂O₂ = 300 mg/l, pH = 7.8, Column number = 4, light intensity = 2400 W/m²).

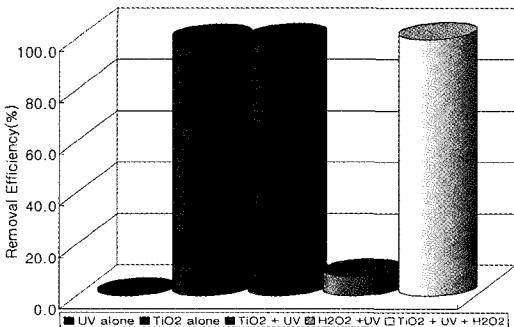


Fig. 5. Variation of T-P of secondary effluent by UV alone, TiO₂ alone, and UV with TiO₂: (Initial T-P = 2.73 mg/l, TiO₂ = 0.25 g/l, H₂O₂ = 300 mg/l, pH = 7.8, Column number = 4, light intensity = 2400 W/m²).

착실험은 37.4%의 제거율을 나타냈으며, TiO₂와 자외선을 첨가시킨 광촉매 실험에서는 51%, 과산화수소에 자외선을 조사시킨 광분해 실험에서 41.4%, 산화제인 과산화수소와 TiO₂를 첨가시켜 자외선을 조사한 실험에서는 65.3%가 제거되었다. 탁도 제거율도 CODcr 제거율과 마찬가지로 광촉매/과산화수소/자외선 공정에서 처리 효율이 가장 우수하였다.

(4) 총인

Fig. 5에 총인 제거율을 나타내었다. 여러 가지 촉매를 사용한 실험결과 광촉매/과산화수소/자외선 공정이 가장 높은 처리효율로서 99.5%가 제거되었다. 광촉매/자외선 공정은 99%, 과산화수소/자외선은 7.6%, TiO₂만 첨가한 흡착실험은 98.8%가 제거되었으며, 자외선만 조사한 실험은 거의 제거율에 변화가 없었다. 본 연구 결과에서 광촉매인 TiO₂를 사용한 TiO₂/H₂O₂/UV, TiO₂/UV 및 TiO₂ 흡착 등의 공정은 자체 TiO₂ 광촉매에 의해 제거된 것으로 판단되며 이는 총인이 TiO₂/H₂O₂/UV와 TiO₂/UV 공정에서 OH라디칼 작용으로 제거된 것이 아니라 단지 TiO₂에 의한 응집현상인 것으로 여겨진다.

(5) 세균 제거율

Fig. 6는 순환식 반응기를 이용하여 실험한 세균의 살균율을 나타내었다. 광촉매/과산화수소/자외선공정이 다른 공정과 비교하여 우수하였으며, 반응시간 20분만에 완전히 살균되었다. 광촉매/자외선 공정도 마찬가지로 반응초기 20분만에 거의 95%가 살균되었으며, 과산화수소/자외선 공정은 93.7%가 살균되었으며, 자외선만 조사한 실험에서는 76.8%가 살균되었다. 단지 광촉매인 TiO₂만 첨가한 흡착 실험의 경우는 27.2%가 살균되었다.

본 실험에서 광촉매인 TiO₂만 첨가한 흡착 실험에서

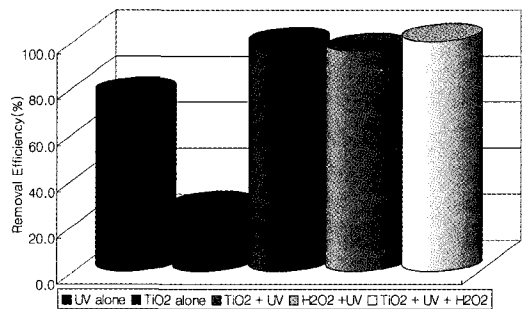


Fig. 6. Variation of Total colonies of secondary effluent by UV alone, TiO₂ alone, and UV with TiO₂: (Initial SPC = 21400000/ml, TiO₂ = 0.25 g/l, pH = 7.8, H₂O₂ = 300 mg/l, Column number = 4, light intensity = 2400 W/m²).

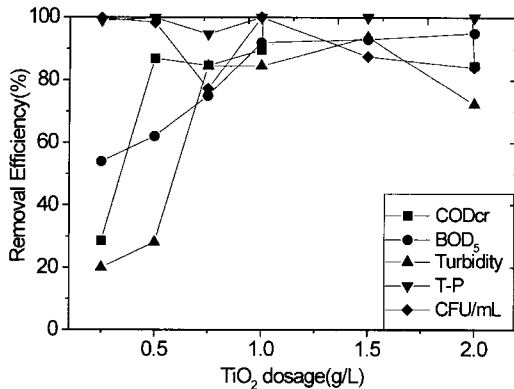


Fig. 7. Effect of TiO₂ dosage on photocatalytic degradation of secondary effluent by TiO₂ with UV: (Initial CODcr = 32.2 mg/l, Initial BOD₅ = 25 mg/l, Initial Nurbidity = 7.2, Initial T-P = 3 mg/l, Initial SPC = 250000/100 ml, pH = 7.8, Column number = 4, light intnsity = 2400 W/m²)

TiO₂ 자체가 미생물의 세포에 침착되어 제거된 것으로 판단되며 촉매제에 자외선을 조사시킨 TiO₂/H₂O₂/UV 및 TiO₂/UV 공정은 강력한 OH radical 및 superoxide radical 의한 미생물 세포의 호흡활성(respiratory activity)을 감소시키거나,¹⁵⁾ 세포자체를 사멸시키는 것으로 알려져 있고,^{16,17)} 또한 이취미 제거, 조류 제거, 부유물질 제거가 가능하여¹⁸⁾ TiO₂만 첨가한 흡착실험과 자외선만 조사된 살균과 비교하여 처리 효율이 뛰어난 것으로 사료된다.

2. 광촉매의 투입량 결정

광촉매/UV 및 광촉매/과산화수소/UV 공정이 본 연구의 중수도 수질 기준인 유기물질(CODcr, BOD₅, TOC), 탁도, 총 세균 등의 기준을 만족시킬 수 있기 때문에 본 연구의 주요 공정임을 확인할 수 있었고 연속식 반응기에서 TiO₂/UV 공정을 이용하여 광촉매량을 0.25~2 g/l까지 투입시켜 실험을 수행하였다. 이 실험은 광촉매인 TiO₂가 자외선의 양을 흡수할 수 있는 최대 흡수등을 결정하기 위하여 실시하였다.

Fig. 7의 결과에서 촉매제인 TiO₂를 0.25 g/l를 주입시켜 자외선을 조사한 경우 TiO₂ 투입량에 따른 각 수질 항목의 제거율을 나타내었다.

CODcr는 28.6%, BOD는 54%, 탁도는 20.2%, T-P는 99%, 총 세균은 99.8%가 제거되었으며, 0.5 g/l를 첨가시킨 경우에는 CODcr는 87%, BOD는 62%, 탁도는 81%, T-P는 99.8%, 총 세균은 98.4%가 제거되었다. TiO₂를 0.75 g/l를 주입시킨 실험에서는 CODcr는

Table 5. Characteristics of UV/TiO₂ System Effluent

Items	Before treatment	After treatment
pH	6.79	7.25
CODcr(mg/l)	32.2	3
BOD ₅ (mg/l)	25	2
Nurbidity(NTU)	7.2	1.1
T-P(mg/l)	3	0
SPC(MPN/ml)	2500000	7

84.7%, BOD는 75%, 탁도는 84.5%, T-P는 94.7%, 총 세균은 77.2%가 제거되었으며 1 g/l를 주입시킨 경우에는 CODcr는 89.7%, BOD는 92%, 탁도는 84.6%, T-P는 100%, 총 세균은 거의 100%가 제거되었다. 1.5 g/l를 주입시킨 경우에는 CODcr는 83.2%, BOD는 93%, 탁도 93.7%, T-P는 100%, 총 세균은 87.6%가 제거되었고, 2 g/l를 주입시킨 경우는 CODcr는 84.6%, BOD는 95%, 탁도는 72.3%, T-P는 92.7%, 총 세균은 84%가 제거되었다.

본 연구로부터 중수도 수질기준 및 처리 비용의 관점에서 촉매의 투입량 결정이 매우 중요하며 제거효율 가장 우수하고 수질기준 및 처리비용의 경제성을 고려할 때 TiO₂ 투입량은 1 g/l이 가장 효율적임이라고 사료된다.

3. 광촉매 반응 시스템에 의한 처리 효과

촉매제인 TiO₂를 이용한 광촉매 반응 시스템은 하수 처리수에 대해서 광촉매 1 g/l 투입하여 광촉매 반응시킨 결과 얻을 수 있는 CODcr, BOD₅, Turbidity, T-P, 세균의 변화는 Fig. 7에 나타내었다. UV 접촉시간 17분에서 중수도 방류수법에 만족할만한 결과를 도출시켰고 Table 5는 그 최종 처리 공정인 광촉매 반응 시스템의 공정에 유입되는 수질 및 방류수에 대한 수질을 분석하였다. 모든 분석결과가 방류 기준에 적합한 것으로 나타났으며, 특히 문제되는 인의 경우 광촉매인 TiO₂의 응집현상에 의하여 거의 제거되는 결과를 얻을 수 있었다. 또한 광촉매반응의 운영적인 면에서 광촉매 반응 시스템은 전력비용을 제외한 광촉매 반응 시스템에서 가장 많은 비용을 차지하는 시약중 광촉매인 TiO₂와 과산화수소, UV lamp의 비용을 산출한 것으로 특히 TiO₂의 비용이 절대적으로 많이 들지만 만약 TiO₂의 회수가 가능하다면 비용이 절감될 것으로 생각이 된다. 국내에서도 TiO₂를 회수하는 장치가 개발되어 막분리, 전기응집 등 고비용의 처리방법을 대신할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 화학적 응집을 많이 사용되고 있지만 상당한 약품을 투입되어 슬러지가 많이 발생되어 이런 슬러지까지 처리해야 하는 단점을 가지고

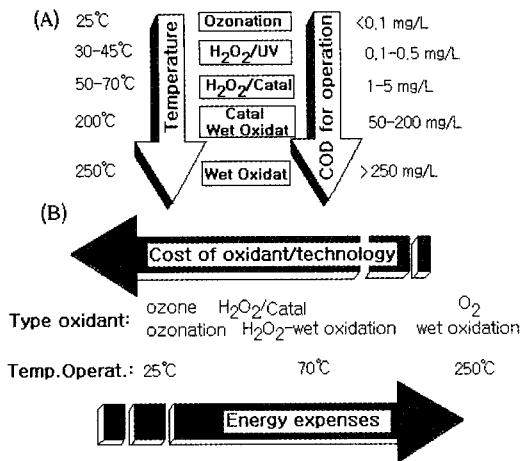


Fig. 8. (a) General relationship between temperature of operation, type of possible water treatment technology and COD content in the inlet water stream for autothermic operations, (b) General relationship between emperature of operation, type of possible oxidant and technology for water treatment and its cost. Source obtained from (19).

있지만 광촉매 반응 시스템은 슬러지 발생이 없어 환경 친화적으로 훨씬 유리할 것으로 생각이 든다.

Fig. 8에서는 일반적으로 화학적 공정에 의해 폐수를 처리 할 경우 여러 가지 폐수의 특성(온도, pH, 폐수의 농도 등)을 파악하여 처리 비용의 가장 적절한 산출하여 최적의 화학적 공정을 개발하는데 목적이 있다고 할 수 있다. 따라서, Fig. 9(a), (b)는 광촉매 시스템을 포함한 여러 고급 산화공정에서 대상 폐수의 농도를 파악하여 적절하게 공정을 적용시킬 수 있다. Fig. 8(a), (b)를 보듯이 촉매를 이용한 산화공정은 저농도에서 고농도에 이르기까지 그 대상물질의 특성에 따라 적용할 수 있다. 본 연구에서는 저농도의 COD 및 TOC를 함유한 2차 처리수를 선택하여 간결한 처리로 수질이 좋은 처리수를 생산할 수 있으므로 그 사용이 증가할 것으로 예상된다. 앞으로는 대상물질의 농도 특성에 따른 연구와 더불어 각 적용하수의 경우 적당한 광촉매 시스템을 도입하기 위한 실험적 연구가 진행되어야 한다고 본다.

V. 결 론

수자원의 부족으로 인한 물의 재사용 차원에서 광촉매반응을 이용한 하수처리장의 유출수를 이용하여 실험을 수행한 결과는 아래와 같다.

- 1) 고급산화공정 중 TiO₂촉매제를 이용한 공정중에서

촉매에 자외선을 조사한 TiO₂/UV 및 TiO₂/H₂O₂/UV공정이 가장 우수한 효과를 나타냈다.

- 2) 적절한 중수도 수질을 얻기 위해 필요한 광촉매 TiO₂의 주입량은 1 g/이었다.

- 3) 단독 처리를 위한 광촉매 반응 시스템의 적용은 총량적인 배출개념으로 볼 때 바람직하다고 판단된다.

참고문헌

- 1) Word Resources Institute 1994-95, New York/Oxford, 1994.
- 2) E. Koch, I. Hauchler.: Gobal Trends 93/94, Fisher Taschenbuchverlag, Frankfurt a.M., 305, 1993.
- 3) 안규홍, 권지향 : 막분리를 이용한 중수도 기술, 화학공업과 기술, 11(6), 466-471, 1993.
- 4) A. Adin, Y. Soffer and R. Ben Aim.: Effluent Pretreatment by Iron Coagulation Applying Various Dose-pH Combinations for Optimun Particle Separation, Proceedings of the Water Quality International 1998-IAWQ 19th Biennial International Conference, 24-31, 1998.
- 5) F. E. Hancock.: Catalytic strategies for industrial water re-use, *Catalysis Today*, 53, 3-9, 1999.
- 6) C. Gabriele, P. Siglinda.: Recycle rinse water: Problems and opportunities, *Catalysis Today* 53, 11-21, 1999.
- 7) 조일형, 김현용, 이용규, 박경렬, 이흥근 : 순환식 반응기에서 UV/TiO₂를 이용한 반응성염료의 제거에 관한 연구, 한국환경위생학회지, 26(1), 64-70, 2000.
- 8) P. Jon and F. D. Ollis.: Iteration of chemical and biological oxidation processes for water treatment; II. Recent illustrations and experiences, *J. Adv. Oxid. Technol*, 2(3), 374-381, 1997.
- 9) 조일형 : 염색폐수의 광촉매분해 최적화를 위한 반응표면 설계 및 요인분석, 서울대학교 석사학위 논문, 2000.
- 10) F. J. Beltran, M. Gonazalez & J. F. Gonzalez: Industrial wastewater advanced oxidation. Part I. UV radiation in the presence and absence of hydrogen peroxide, *Wat. Res.*, 31(10), 2405-2414, 1997.
- 11) 김현용, 조일형, 이소진, 기원주, 이흥근 : 순환식 반응기에서 TiO₂광촉매를 이용한 Chromium(VI)의 제거에 미치는 영향인자에 대한 연구, 한국환경위생학회지, 25(3), 64-69, 1999.
- 12) D. R. Susan, D. T. Alfred, W. C. Timothy, S. P. Kathleen, W. L Benjamin, and C. I. John.: Identification of TiO₂/UV Disinfection Byproducts in Drinking Water, *Environ. Sci. & Technol.*, 30, 3327-3334, 1996.
- 13) W. G. Barb, J. H. Baxendale, P. George and K. R. Hargrave.: Reactions of ferrous and ferric ions with hydrogen peroxide, Part I-The ferrous ion reaction. *Trans. Farad. soc.*, 47, 462-500, 1951.
- 14) S. D. Richardson, A. D. Thruston, T. V. Caughran, P. H. Chen, T. W Collette, T. L. Floyd, K. MSchenck, B.

- W Lykins, G. R Sun, G. Majetich.: 1999 Identification of new ozone disinfection byproducts in drinking water. *Environ. Sci. & Tech.*, **33**(19), 3368-3377.
- 15) Matsunaga, T.: Tomoda, R.; Nakajima, T. Wake, H. Photoelectron- chemical sterilization of microbial cells by semiconductor powder, *FEMS Microbiol. lett.*, **29**, 211-214, 1985.
- 16) Ireland. J. C. Klostermann, P. Rice, E. W. and Clark, R. M.: Microbiological issues to drinking water disinfection chemistry : opportunities for further TiO₂ research, Photocatalytic purification and treatment of water and air, *Elsevier science publishers B.* 557-571, 1993.
- 17) Matsunaga T. Tomoda, R. Nakajima, T. Nakamura, N. Komine, T.: Continuous-sterilization system that uses photosemiconductor powder, *Applied and Environ. Microbiol.*, **54**, 1330-1333, 1988.
- 18) 조영찬, 강희정, 정경훈, 정오진 : 광촉매 자외선을 이용한 식물성 플랑크톤의 제거, *한국환경과학회, 추계학술발표회*, **10**, 129-138, 1998.
- 19) Gabriele C and Singlinda P.: Recycle rinse water; problems and opportunities, *Catalysis Today*, 11-21, 1999.