

TiO₂/UV 회전반응기를 이용한 한강 휴믹물질의 광촉매산화 처리 및 특성 변화

신지원 · 김현철* · 한인섭†

서울시립대학교 환경공학부 · *한국과학기술연구원 수질환경 및 복원연구센터

(2005년 1월 5일 접수, 2005년 10월 30일 채택)

Photocatalytic Oxidation of Han River Humic Substances and Change of Their Characteristics by TiO₂/UV in a Rotating Photoreactor

Jee Won Shin · Hyun Chul Kim* · Ihnsup Han†

Department of Environmental Engineering, The University of Seoul

*Water Environment and Remediation Center, Korea Institute of Science and Technology

ABSTRACT : In this study, the applicability of a rotating reactor for the oxidative removal of aqueous humic substances extracted from the Han River in Seoul, Korea was investigated. As air blowing for proper mixing of TiO₂ photocatalyst could inhibit UV-irradiation between a UV lamp and photocatalyst by air bubbles, a rotating reactor with some baffles was used for better UV-irradiation effect in this study. Han River humic substances are different from the other commercial humic substances(e.g., from Aldrich and International Humic Substance Society). Their characteristics were investigated with structural and spectroscopic analyses using FT-IR(Fourier transform-infrared), and ¹³C-NMR (nuclear magnetic resonance). The humic substances were extracted by XAD-7HP and treated with TiO₂-coated hollow beads under UV-A and UV-C irradiation in order to solve problems of separation and recovery of photocatalyst after reaction. At approximately 5 mg/L of initial TOC concentration, pH 3 and 2.0 g-TiO₂/L dose, photocatalytic oxidation of Han River humic substances showed the optimum removal efficiency. Also, UV-C and UV-A lamps showed similar TOC removal efficiency. However, under UV-C irradiation, Han River humic substances were degraded to smaller compounds and increased the proportion of low molecular weight fractions compared to UV-A.

Key Words : Photocatalytic Oxidation, Humic Substance, FT-IR, ¹³C-NMR

요약 : 한강에서 추출한 휴믹물질의 산화를 위해 회전 반응기를 도입하였다. TiO₂ 광촉매의 혼합을 위해 사용되는 공기는 UV 램프와 광촉매 사이에서 UV 조사를 방해할 수 있으므로, 더 나은 UV 조사율을 위해 반응기 내부에 배플이 설치된 회전 반응기를 고안하였다. FT-IR, ¹³C-NMR의 분석 결과, 한강 휴믹물질은 다른 상용화된 휴믹물질과는 다른 특성을 보여주었다. XAD-7HP 수지로 분리된 한강 휴믹물질을, 반응 후 광촉매의 분리 및 회수문제를 해결하기 위해, TiO₂를 hollow bead에 고정화한 광촉매와 UV-A, UV-C 램프를 사용하여 광촉매산화시켰다. 초기 휴믹물질의 TOC 농도가 5 mg/L일 때, 초기 pH 3, TiO₂ 투입량 2.0 g/L을 최적 조건으로 결정하였다. 또한 UV-C와 UV-A 램프의 비교실험을 수행한 결과, 비슷한 TOC 제거율을 보였다. 하지만, 분자량 분포 실험 결과, UV-A 램프보다 UV-C 램프로 광촉매산화시킨 것이 상대적으로 저분자량 부분이 증가하였다.

주제어 : 광촉매산화, 휴믹물질, FT-IR, ¹³C-NMR

1. 서론

오존은 강력하고 효과적인 산화제로서 음용수 처리 공정에서 사용이 증가하고 있지만 오존산화는 제거대상 유기물과 선택적으로 반응할 뿐만 아니라, 완전하게 산화되지 못한 반응생성물에 의한 2차 오염문제와 같은 단점이 있기 때문에 정수처리에서는 후처리가 반드시 필요하다. 최근 이와 같은 오존산화의 대체 공정으로 널리 연구되고 있는 광촉매산화 기술은 이산화티타늄(TiO₂)과 같은 반도체에 Band gap 이상의 에너지를 갖는 파장의 UV를 조사할 경우 전자 전이

로 인하여 TiO₂ 표면에서 생성되는 OH 라디칼을 이용하여 유기물질을 분해하는 기술이다. 오존처리공정에서는 트리할로메탄(THMs; trihalomethanes), 할로아세트산(HAAs; haloaceticacids) 및 알데하이드(aldehyde), 브로메이트(bromate)와 같은 반응부산물 생성이 보고된 것과 달리 광촉매산화공정에서는 위해성을 가진 반응부산물의 생성이 알려져 있지 않기 때문에 앞으로 정수처리 공정에 대한 적용 가능성이 매우 크다.¹⁻³⁾

휴믹물질(HS; humic substances)은 자연발생적인 유기화합물로서 식물성분이 토양 중에서 분해 및 축합되어 생성되거나 수중 동·식물에 의해 파생된 고분자 화합물로서 지표수 및 상수 원수 중 총유기탄소의 25%를 차지하고 있고, 해수 및 담수 내 유기탄소의 50%를 차지하고 있으며, 호소수의

† Corresponding author
E-mail: ishan@uos.ac.kr
Tel: 02-2210-2418

Fax: 02-2244-2245

경우 용존 유기물질의 약 80%가 휴믹물질에 기인한다. 정수처리 공정 중 염소와 반응하여 발암물질인 소독부산물 형성의 중요한 전구물질로 밝혀진 바 있는 휴믹물질은 상수처리 과정에서 응집공정을 방해하거나 활성탄 흡착공정에서 비가역적 흡착의 원인이 되기도 하고 중금속 및 유기물과 착물을 형성하기도 하며, 관로상에서 THM등의 소독부산물을 형성하기도 한다.⁴⁾ 따라서 안전한 먹는 물을 생산하고 공급하기 위해서는 반드시 휴믹물질이 제거되어야 한다.

본 연구에서는 오존산화의 대체 공정으로 광촉매산화 기술을 도입하여 제거효율을 평가하고자 하였다. 광촉매산화 반응 후 광촉매의 분리 및 회수문제를 해결하기 위해, TiO₂를 hollow bead에 고정화한 광촉매를 사용하였고, 보다 효율적인 UV 조사율을 위해, 반응기 내부에 배플(baffle)이 설치된 TiO₂/UV 회전 반응기를 새롭게 고안하였다. 또한 수원지의 특성을 고려하여 상수 원수에서 한강 HS를 추출하여 광촉매산화 효율을 평가하였고, 한강 HS의 처리 특성에 미치는 UV 파장의 영향을 알아보았다. 그리고 상수 원수와 전염소처리수의 광촉매산화 효율을 비교하여 실제 수처리 공정의 적용성을 평가하였다.

2. 실험장치 및 분석방법

2.1. TiO₂/UV 회전 반응기

본 실험에 사용된 회전식 형태의 TiO₂/UV 회전 반응기의 개략적 모식도를 Fig. 1에 나타내었다. 광촉매 입자를 용액 중에 부유상태로 유지하기 위해서 일반적으로 공기를 사용하지만, UV 램프와 광촉매 사이의 공기방울로 인한 자외선 조사가 방해받을 우려가 있기 때문에, 본 연구에서는 UV 조사율을 높이기 위해 배플이 부착된 회전식 광촉매 반응기를 사용하였다. 길이 30 cm, 안지름 8 cm의 pyrex로 제작된 반응기의 중심부에는 UV 램프를 넣을 수 있는 석영관을 고정하였으며, 반응기 내부 벽면에는 광촉매의 적절한 혼합을 위해 배플을 설치하였다. 사용된 광촉매의 분리 및 회수가 어려운 단점을 해결하기 위해 사용된 광촉매(IMP-nb5H Photocatalyst Hollow Bead, Nanosolution)는 TiO₂ 분말을 코팅시킨 크기 약 500 μm의 비중 1 이하의 hollow bead로서 배플 및 회전에 의해 반응기 내부에서 적절하게 유동되었다.¹²⁾

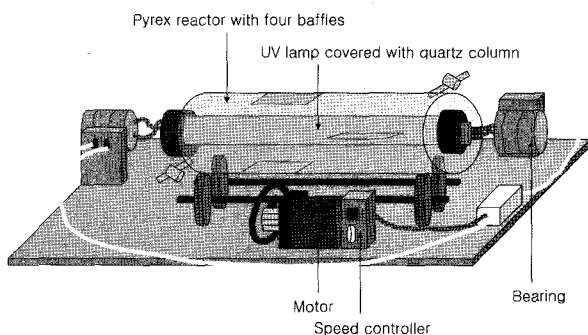


Fig. 1. Schematic diagram of the rotating photoreactor.

Table 1. Various instruments to analyze water quality

Parameters	Instruments
pH, Temp.	725P pH meter, istek
Turbidity	2100P Turbidimeter, Hach
UV ₂₅₄	DR4000U Spectrophotometer, Hach
TOC	TOC-V CPH Total organic carbon analyzer, Shimadzu

UV를 조사하면서 반응기를 돌리 위에 고정하고 돌리에 연결된 모터로 반응기를 회전시켰으며, 반응기의 외벽은 aluminum foil로 차폐하여 램프의 광자들이 유실되는 것을 방지하였다.

2.2. 실험방법 및 분석

2.2.1. 휴믹물질의 분리

수원지의 천연유기물질(NOM; natural organic matter) 특성을 파악하기 위해, 한강원수를 대상으로 Table 1과 같이 pH, 수온, 탁도, UV₂₅₄, 총유기탄소(TOC; total organic carbon) 등의 수질 항목을 분석하였다. G 취수장의 원수를 시료채취하여 XAD-7HP 수지(Amberlite, Rohm & Hass co., France)를 사용하여 소수성과 친수성 NOM으로 분류하였다. 연속 soxhlet 추출법을 변형한 방법을 사용하여, 한강원수를 0.45 μm 막여과지로 여과하고 (1+1) HCl을 이용하여 pH 2 이하로 조절한 다음 세정한 XAD-7HP 수지가 충전된 유리제 이온교환칼럼에 15~20 mL/min의 유속으로 통과시켰다. 칼럼을 통과한 유출수 중의 NOM을 친수성 NOM(hydrophilic fraction), 그리고 수지층에 흡착된 부분을 소수성 NOM(hydrophobic fraction)으로 구분하였으며, 흡착이 완료된 후 500 mL의 0.1 N-NaOH 용액을 시료흐름의 역방향으로 유입시켜 소수성 NOM을 용리하였다. 또한 휴믹물질인 소수성 NOM은 IRC-50 양이온 교환수지(Amberlite, Rohm & Hass co., France)를 이용하여 Na⁺ 이온을 H⁺ 이온으로 치환시킨 다음 동결건조(OPR-FDU-7003 Freeze Dryer, Operon)하였다.^{5,15,16)}

2.2.2. 휴믹물질의 처리 및 분석

2.2.2.1. 휴믹물질의 특성 분석

한강원수로부터 분리된 휴믹물질(Han HS)과 상용화된 휴믹물질인 국제부식학회(IHSS; International Humic Substances Society)의 휴믹물질(IHSS Suwannee River NOM 1R101N, USA) 그리고 Aldrich사의 휴믹산(Aldrich Humic acid, CAS no. 68131-04-4, Aldrich chem., USA)을 분광학적으로 분석하였다. 분광학적 분석은 FT-IR(Fourier transform/infrared-5300 spectrometer, Jasco) 및 ¹³C-NMR (400 MHz, Solid/Micro - Imaging High Resolution Nuclear Magnetic Resonance, AVANCE 400 WB, DSX-400, Bruker) 스펙트럼을 찍어서 구조적 특성을 분석하였다.

2.2.2.2. Han HS의 광촉매산화 실험

휴믹물질의 수원지별 특성 및 우리나라 수계의 최대 TOC

농도를 고려하여 G 취수장 원수에서 분리한 Han HS를 TOC가 대략 5 mg/L가 되도록 희석하여 처리대상 원수로 사용하였다. 광촉매산화에서 중요한 인자 중 하나인 반응 초기 pH의 영향을 조사하기 위하여 1 N-NaOH와 1 N-HCl를 사용하여 시료의 pH를 3.02, 7.01 및, 11.08로 조절하였다. 정량펌프를 이용하여 TiO₂/UV 회전 반응기에 제조한 시료를 기포없이 채우고 UV-C를 30, 60, 90, 120분 동안 조사한 후 시료를 채취하였다.

광촉매 자체의 휴믹물질의 흡착반응과 광촉매 표면의 TiO₂가 UV 조사될 때 전자가 전이되면서 생기는 OH 라디칼에 의한 순수 휴믹물질 산화반응을 구분하기 위해 UV를 조사하지 않은 상태에서 광촉매로 사용된 hollow bead 형태의 TiO₂의 흡착능을 측정하였다. pH 3, TOC 5.4 mg/L의 농도의 조제수에 TiO₂의 주입농도를 0.5 g/L, 2.0 g/L로 변화시켜 실험을 수행하였다.

UV 파장에 따른 광촉매산화 효율을 조사하기 위해 15W UV-A(352 nm, FL15BLB, Sankyo Denki, Japan)와 15W UV-C(254 nm, GL15, Sankyo Denki, Japan) 램프를 사용하여 광촉매산화 반응을 시킨 후 TOC, UV₂₅₄, 분자량 분포를 측정하였다.

분자량 분포를 분석하기 위하여 용량 200 mL의 교반 cell (Model 8200 stirred cell, Amicon)을 사용하여 한외여과를 수행하였으며, cell은 질소가스를 이용하여 55 psi로 가압하였다. 실험에 사용한 한외여과막은 직경 63.5 mm의 셀룰로오스 재질로서 분획분자량이 100 K, 10 K, 1 K, 0.5 K daltons인 UF membrane(YM100, YM10, YM1, YC0.5, Millipore)를 이용하여 대상원수를 0.45 μm 막여과지로 여과한 후 여액을 순차적으로 여과하여 분리하였다.

광촉매산화의 실제 수처리 공정에 대한 적용성을 평가하기 위하여, 한강의 G 취수장 원수와 G 정수장 전염소처리수로 광촉매산화 실험을 수행한 후, TOC, UV₂₅₄, 분자량 분포를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 휴믹물질의 특성 분석

휴믹물질의 분리 실험에 사용된 G 취수장의 한강원수 기초 수질 분석 결과를 Table 2에 나타내었다.

휴믹물질에 대한 화학적 처리공정에서, 완전히 분해되지 않고 잔존하는 중간 생성물질의 특성을 규명하고 작용기의 형태 변화를 파악하는 것은 보다 효율적인 처리 시스템을 구축하는데 매우 중요하다.⁶⁾ 따라서 휴믹물질의 구조적 특징에 대한 정보를 얻기 위하여 FT-IR과 ¹³C-NMR 스펙트럼을 측정하여 각각 Fig. 2 및 Fig. 3에 나타내었다.

Table 2. The Han River water quality

item	pH	Temperature (°C)	Turbidity (NTU)	UV Absorbance (254 nm)	TOC (mg/L)
value	8.87	6.1	4.34	0.1070	2.56

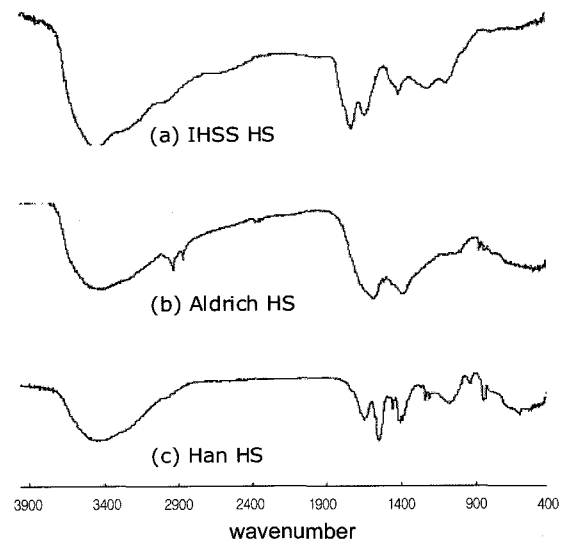


Fig. 2. FT-IR spectrum of humic substances isolated from various sources (Infrared spectra were obtained with a medium slit and a peak resolution of 4.0 cm⁻¹, using a KBr pellets.)

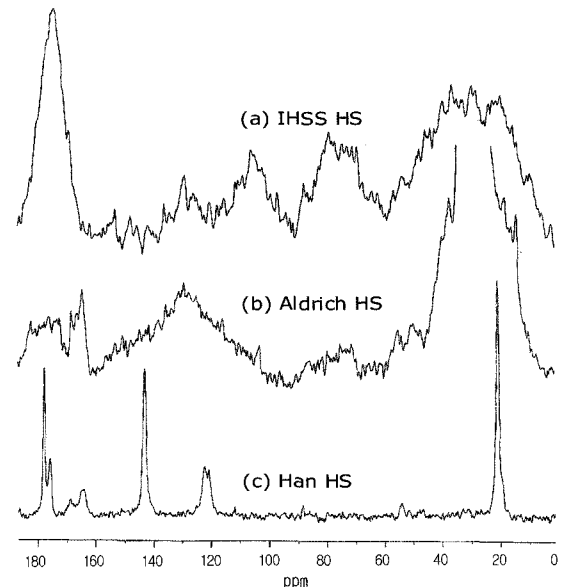


Fig. 3. ¹³C-NMR spectrum of humic substances isolated from various sources (The samples were spun at a rate of 7 kHz at room temperature in a 4 mm rotor. The contact time and spectral width were 3 ms and 31 kHz, respectively, acquisition time was 35 ms, time domain points 2230.)

FT-IR은 특정 분자 구조와 다양한 작용기의 분석에 이용되는데, Han HS, IHSS HS, Aldrich HS의 IR 피크에서 공통적으로 3400 cm⁻¹대에서 강한 OH stretching 피크와 1690~1710 cm⁻¹대에서 C=O stretching 피크, 그리고 1240 cm⁻¹대에서 C-O stretching 피크가 관찰되었다.^{8~10)} 1580 cm⁻¹과 1460 cm⁻¹대의 방향족 고리의 C=C stretching 피크가 Han HS에서 관찰된 반면, Aldrich HS에서는 2930 cm⁻¹대의 C-H

stretching 피크가 관찰되었다. 이와 같은 결과는 Han HS가 방향족 고리를 많이 포함하고 있음을 보여준다. IHSS는 1730 cm^{-1} 대의 C=O stretching 피크가 관찰되었는데 이것은 산소 작용기를 많이 포함하고 있음을 말해준다.

^{13}C -NMR 스펙트럼을 이용하면 화학적 이동값(chemical shift)을 근거로 하여 휴믹물질 내의 탄소가 어떤 환경에 있는지 알 수 있다.¹³⁾ 0~50 ppm대의 지방족 탄소 피크, 50~112 ppm대의 산소가 결합된 탄소 피크, 112~145 ppm대의 방향족 탄소 피크, 145~163 ppm대의 페놀기(phenolic)의 탄소 피크, 163~190 ppm대의 카르복실(carboxylic) 작용기가 결합된 탄소 피크로 구분할 수 있다. FT-IR 스펙트럼의 분석결과와 마찬가지로 140 ppm대의 큰 피크로부터 Han HS가 다른 상용화된 HS와는 달리 방향족 탄소를 이루어져 있으며, IHSS는 80 ppm 대의 큰 피크로부터 산소를 포함하는 작용기가 많음을 알 수 있다.

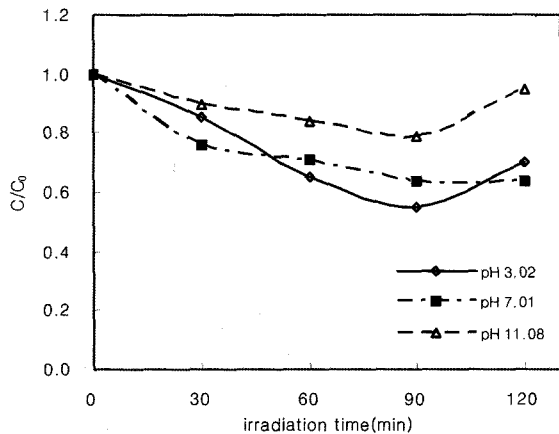
이와 같이 FT-IR, ^{13}C -NMR 스펙트럼 분석결과 상용화된 IHSS HS 또는 Aldrich HS와 Han HS는 휴믹물질을 이루고 있는 화학적 구조의 특징이 매우 다른 것을 알 수 있다. 따

라서 본 연구에서는, 휴믹물질의 구조적인 차이가 광촉매산화 처리 과정이나 처리 결과에 영향을 미칠 것으로 예상하여 Han HS를 대상으로 실험을 수행하였다. 또한 실제 정수처리 공정에 적용될 경우를 고려하여 상용화된 휴믹물질이 아닌 상수 원수로부터 추출한 휴믹물질을 광촉매산화 실험에 이용하였다.

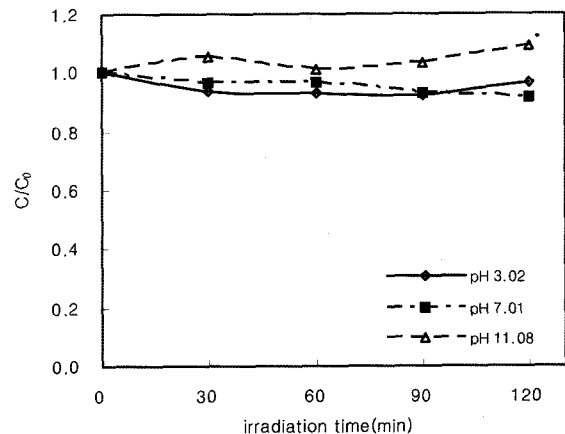
3.2. Han HS의 광촉매산화

광촉매로 사용된 TiO_2 의 zpc(zero point of charge)가 pH 6.25로서 제거대상물질이 휴믹물질과 같이 (-)전하를 띠 때에는 TiO_2 표면 전하가 (+)가 되는 pH 6.25 이하인 산성 영역에서 많이 제거된다는 기존의 연구를 근거로 하여, TiO_2 를 주입하지 않고 UV-C만 조사하여 120분 동안의 UV_{254} 와 TOC를 측정된 결과 Fig. 4와 같이 pH 3.02에서 제거효율이 가장 좋은 것으로 관찰되었다.¹¹⁾

UV 조사없이 TiO_2 만 0.5 g/L 및 2.0 g/L 주입하여 120분 동안 UV_{254} 와 TOC를 분석한 결과 Fig. 5와 같이 휴믹물질이 TiO_2 에 흡착되는 현상은 나타나지 않았다. 반면에, TiO_2

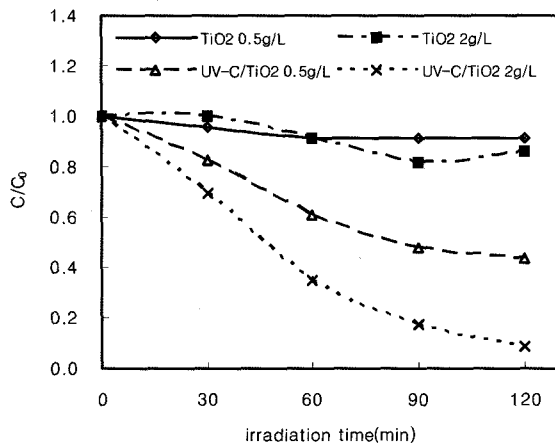


(a) UV_{254} removal efficiency

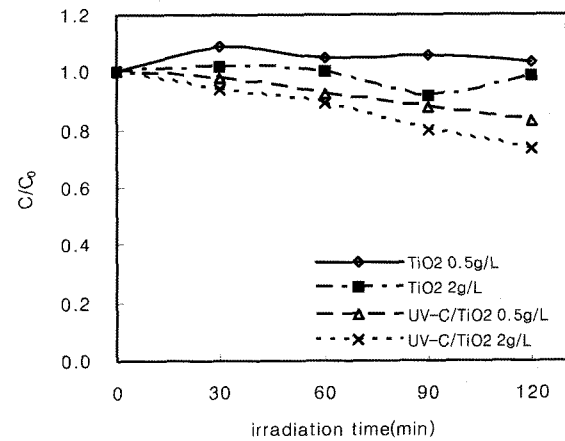


(b) TOC removal efficiency

Fig. 4. Removal efficiency of Han River humic substances at various pH conditions without TiO_2 (Initial $\text{UV}_{254} = 0.018 \sim 0.020 \text{ cm}^{-1}$, Initial TOC = 4.7~4.9 mg/L).



(a) UV_{254} removal efficiency



(b) TOC removal efficiency

Fig. 5. Removal efficiency of Han River humic substances by TiO_2 adsorption without UV irradiation and various TiO_2 dose with UV irradiation at initial pH 3 (Initial $\text{UV}_{254} = 0.023 \sim 0.027 \text{ cm}^{-1}$, Initial TOC = 5.3~5.4 mg/L)

0.5 g/L 및 2.0 g/L을 주입하고 UV-C를 120분 동안 조사하면서 얻어진 시료의 UV₂₅₄와 TOC를 분석한 결과 TiO₂ 농도가 2.0 g/L일 때, UV 조사 120분 후에 UV₂₅₄와 TOC의 제거효율은 각각 91.3%, 26.6%로 나타났다.

UV₂₅₄의 감소율이 TOC의 감소율보다 크게 나타난 것은 254 nm의 흡광도를 유발하는 방향족과 이중결합작용기를 많이 포함하고 있는 고분자의 휴믹물질이 광촉매 산화에 의해 저분자 유기물질로 전환되어 UV₂₅₄에서의 흡광도는 감소하지만 부분산화에 의해 여전히 유기탄소의 형태로 용액 중에 용존된 상태로 존재하기 때문으로 판단된다.³⁾

UV 램프 파장에 따른 광촉매산화 실험 결과 Fig. 6과 같이 TiO₂를 주입하지 않고 UV-A 또는 UV-C만 조사하며 120분 동안 UV₂₅₄, TOC를 분석한 결과 UV-C가 상대적으로 높은 제거효율을 나타내었다. 하지만 2.0 g/L의 TiO₂를 주입하고 UV-A 또는 UV-C를 조사한 경우 반응 120분 후 UV-A의 UV₂₅₄ 감소율은 92.6%, UV-C는 91.3%, TOC 감소율은 UV-A인 경우 32.0%, UV-C인 경우 26.6%로서 제거효율에 있어서 큰 차이를 나타내지 않았다.

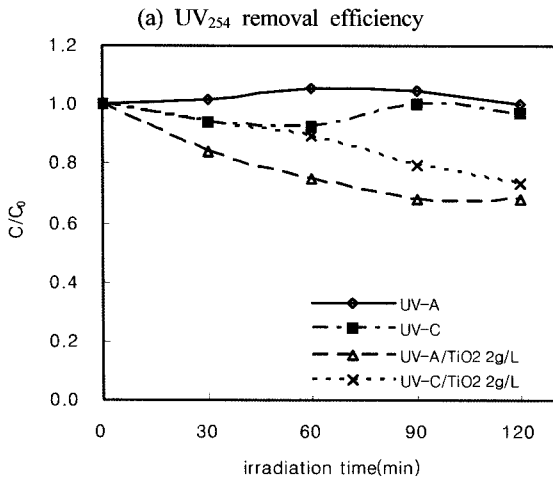
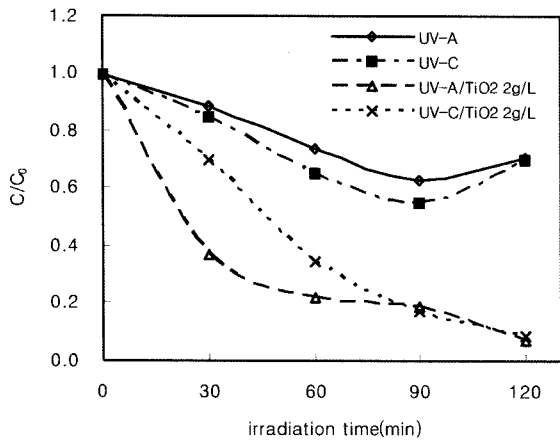


Fig. 6. Removal efficiency of Han River humic substances by TiO₂/UV-C and TiO₂/UV-A at initial pH 3 (Initial UV₂₅₄ = 0.023~0.027 cm⁻¹, Initial TOC = 6.763 mg/L).

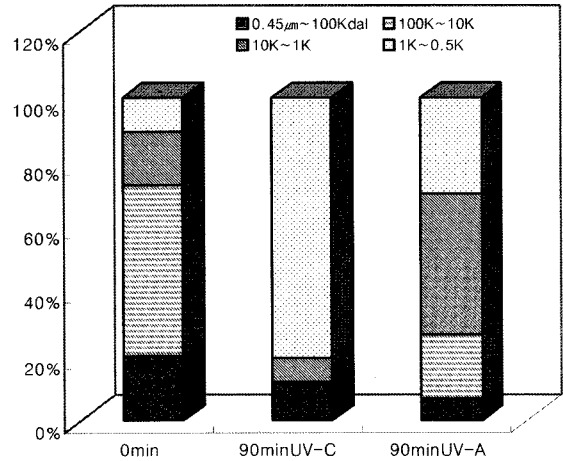
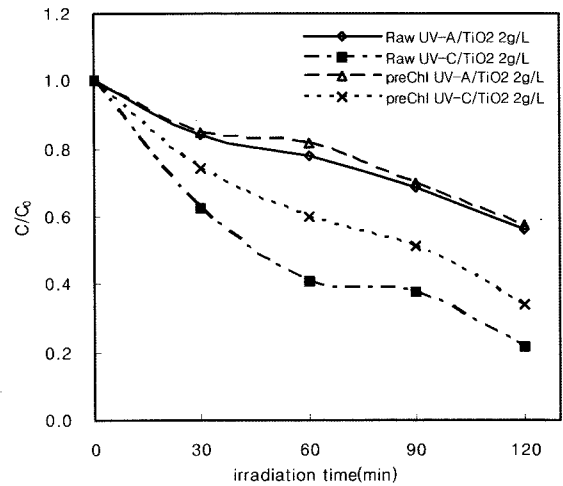
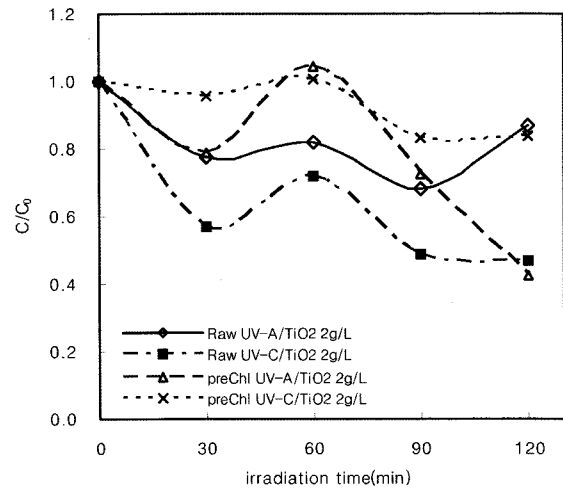


Fig. 7. Change of molecular weight distribution by TiO₂/UV-C and TiO₂/UV-A at initial pH 3.



(a) UV₂₅₄ removal efficiency



(b) TOC removal efficiency

Fig. 8. Humic substances removal efficiency of raw and pre-chlorinated waters in TiO₂/UV treatment without adjusting initial pH (Initial UV_{254,Raw} = 0.032 cm⁻¹, UV_{254,prechl.} = 0.033 cm⁻¹, Initial TOC_{Raw} = 1.276 mg/L, TOC_{prechl.} = 1.542 mg/L).

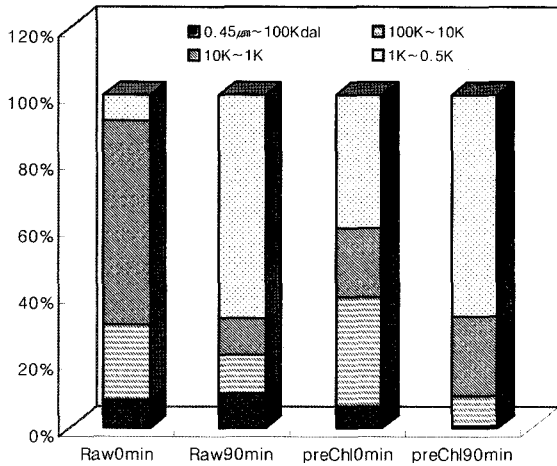


Fig. 9. Change of molecular weight distribution of raw and prechlorinated waters in TiO₂/UV-C treatment.

휴믹물질의 분자량을 0.45 µm~100 K, 100~10 K, 10~1 K, 1~0.5 K dalton으로 나누어 최적 반응 조건인 pH 3, 2.0 g-TiO₂/L, UV-A 또는 UV-C를 90분간 조사한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 100,000 dalton 이상의 고분자물질은 초기 20%에서 UV-C의 경우 11%로, UV-A의 경우 6.8%로 감소하였고, 1,000 dalton 이하의 저분자물질은 초기 10%에서 UV-C에 의해 81%로, UV-A에 의해 30%까지 증가하였다. 하지만 이와 같이 분자량 분포에서 저분자량 물질이 증가하는 것은 생물학적처리에 큰 활성을 줄 것이며, 저분자 용존성 물질의 증가는 생물활성탄 여과공정과 연계하여 처리할 경우 효과적으로 제거할 수 있을 것으로 판단된다.⁷⁾

실제 G 취수장의 원수와 G 정수장의 전염소처리수를 이용하여 광촉매산화 효율 실험을 수행한 결과 Fig. 8에서 나타난 바와 같이 UV-A보다 UV-C에 의해 UV₂₅₄와 TOC의 제거효율이 높은 것으로 조사되었다. 원수에 비해 전염소처리수를 광촉매 산화시켰을 때 UV₂₅₄와 TOC의 제거효율이 낮게 나타났는데 이것은 전염소처리에 의해 수중의 고분자 휴믹물질이 염소와 반응하여 생성된 화합물이 염소가 결합되지 않은 화합물보다 산화되기 어렵기 때문이다.¹⁴⁾

실제 원수와 전염소처리수를 광촉매산화시킨 후, UV₂₅₄와 TOC의 감소율이 가장 좋은 TiO₂ 농도가 2.0 g/L이고, UV-C를 90분 동안 조사했을 때의 시료수를 채취하여 각각의 분자량 분포를 조사하였다(Fig. 9). 90분의 광촉매산화 이후 분자량 분포는 원수와 전염소처리수 모두 저분자물질의 분율이 증가하였고, 원수에 비해 전염소처리수에서 상대적으로 저분자물질의 분율이 큰 것을 알 수 있다.

4. 결론

FT-IR, ¹³C-NMR 스펙트럼 분석을 통해 수원지에 따라 HS의 화학적, 구조적 특성이 다르고 특히 Han HS는 다른 상용화된 휴믹물질보다 상대적으로 방향족 탄소를 더 함유하고 있음을 알 수 있었다. 회전반응기와 hollow bead 형태의 광

촉매를 이용하여 Han HS를 광촉매산화시킨 결과, 초기 Han HS의 TOC 농도가 5 mg/L이고, 초기 pH 3, TiO₂ 주입률 2.0 g/L일 때 UV-C와 UV-A 램프가 모두 UV₂₅₄는 90% 이상, TOC는 30% 정도의 제거효율을 보였다. 하지만 분자량 분포 실험 결과, UV-C 램프를 이용한 광촉매산화방법이 UV-A 램프에 비해 유기물질의 저분자화에 효과적이었다. 또한 실제 수처리 공정에 적용성을 평가하기 위한 원수와 전염소처리수의 실험 결과, UV-C 램프가 UV-A 램프보다 유기물 제거측면에서 상대적으로 더 높은 효율을 나타내었다. 전염소처리수보다 원수를 광촉매산화시켰을 때 TOC와 UV₂₅₄ 제거효율이 높았으므로 전염소처리 이전의 원수에 TiO₂/UV 공정을 적용하는 것이 효과적이라 판단된다.

사 사

본 연구는 서울 지방 중소기업청 2004년도 산학연 공동기술개발 컨소시엄 사업(과제번호: 2004-6)의 연구비 지원으로 이루어진 결과이며 따라서 이에 감사를 포함한다.

참고문헌

1. 김종부, 이동석, "화학적 산화법에 의한 부식산의 분해 처리기술에 관한 연구(1)," *Analytical Sci. and Technol.*, **13**(2), 234~240(2000).
2. 안복엽, 석상일, 서태수, 이동석, 김종부, "TiO₂ 광촉매 격자코팅막을 이용한 자외선 정수장치에 관한 연구," *대한환경공학회지*, **23**(7), 1205~1210(2001).
3. 손희종, 류동춘, 최동훈, 조규갑, 김종수, "광촉매 산화장치의 상수도 적용성 평가," *대한환경공학회지*, **24**(12), 2191~2202(2002).
4. 이동석, 정영림, "화학적 산화법에 의한 부식산의 분해 처리 기술에 관한 연구(2)," *Analytical Sci. and Technol.*, **13**(2), 241~249(2000).
5. 김현철, "한강원수의 정수과정 중 용존유기물질에 대한 특성연구," 서울시립대학교 박사학위 논문(2004).
6. 김종부, 이동석, 신현상, "광산화 공정에서의 부식산의 구조특성 변화에 관한 연구," *대한환경공학회지*, **25**(7), 883~888(2003).
7. 김종부, 김계월, 이동석, "부식질의 광산화 및 오존산화에 있어서의 분자량 크기분포 변화 특성에 관한 연구," *Analytical sci. and Technol.*, **16**(4), 198~205(2003).
8. Kang, K. H., Shin, H. S., Park, H., "Characterization of humic substances present in landfill leachates with different landfill ages and its implications," *Water Res.*, **36**, 4023~4032(2002).
9. Ma, H., Allen, H. E., Yin, Y., "Characterization of isolated fractions of dissolved organic matter from natural waters and a wastewater effluent," *Water Res.*, **35**(4),

- 985~996(2001).
10. Lin, C. F., Liu, S. H., Hao, O. J., "Effect of functional groups of humic substances on UF performance," *Water Res.*, **35**(10), 2395~2402(2001).
 11. Moon, J., Yun, C. Y., Chung, K. W., Kang, M. S., Yi, J., "Photocatalytic activation of TiO₂ under visible light using Acid Red 44," *Catalysis Today*, **87**, 77~86(2003).
 12. 권정미, 김용환, 류정용, 송봉근, 김범수, 임정빈, "개선된 고정화 광촉매 제조 및 이를 이용한 아조 염료 분해," *대한환경공학회지*, **26**(3), 263~269(2002).
 13. Chen, J., Gu, B., LeBoeuf, E. J., Pan, H., Dai, S., "Spectroscopic characterization of the structural and functional properties of natural organic matter fractions," *Chemosphere*, **48**, 59~68(2002).
 14. Serodes, J. B., Rodriguez, M. J., Li, H., and Bouchard, C., "Occurrence of THMs and HAAs in experimental chlorinated waters of the Quebec City area (Canada)," *Chemosphere*, **51**(4), 253~263(2003).
 15. 유명진, 김용환, 한인섭, 김현철, "다양한 생성지로부터 분리된 휴믹물질의 물리·화학적 및 구조적 특성에 따른 활성탄 흡착특성의 평가," *대한환경공학회지*, **26**(9), 1031~1037(2004).
 16. Yu, M. J., Kim, Y. H., Han, I., Kim, H. C. "Ozonation of Han River humic substances," *Water Sci. and Technol.*, **46**(11-12), 21~26(2002).