

오존과 광촉매를 이용한 Geosmin 제거 및 부산물 생성에 관한 연구

김영웅 · 손희종 · 유명호 · 김성윤* · 김철**

부산시 수질연구소
*동경공업대학 원자로공학연구소
**동의공업대학 환경시스템공학과

A Study on removal of Geosmin by Ozonation and Photocatalysis and Generation of by-products

Young-Ung Kim · Hee-Jong Son · Myung-Ho Yu ·
Seong-Yun Kim* · Chul Kim**

Pusan Water Quality Institute
**Research Laboratory for Nuclear Reactors, Tokyo Institute of Technology*
***Department of Environmental System Engineering, Donggeui Institute of Technology*

Abstract

This study was carried out comparing with ozone oxidation and photocatalytic degradation for removal of geosmin. In the change of pH, Ozonation, UV-Germicidal lamp and Halogen lamp irradiation and Halogen lamp/TiO₂ Powder was very slowly changing, but UV-Germicidal lamp/TiO₂ Powder was rapidly changed from 7.0 to 7.7 until 300min of irradiation time, and varied a little after.

Geosmin degradation ratio was as following, UV-Germicidal lamp/TiO₂ Powder_(200mg/L) ≥ O₃ > UV-Germicidal lamp/TiO₂ Pw_(100mg/L) > UV-Germicidal lamp > Halogen lamp.

The result of investigation of generated by-products were 3-Heptanone, two sort of aldehydes and three sort of alcohols by ozonation. But It was not generated by photocatalytic degradation.

KEYWORDS : photocatalytic degradation, Ozonation, UV/TiO₂, Geosmin, By-Products

1. 서 론

하천수를 상수원으로 이용하는 지역에서는 계절별로 나타나는 다양한 조류종들로 인하여 여과지 폐쇄, 과도한 약품투여, THMs와 같은 부산물 생성으로 정수처리에 직·간접적인 어려움을 야기시키고 있으며, 또 이들에 의해 발생하는 이취로 수돗물의 민원발생이 증가하고 있는 추세에 있다. 수돗물에서의 이취발생은 극미량 잔류농도에서도 그 효과가 크다는 점 때문에 세계 각국에서 처리방안에 대한 연구가 다양하게 진행되고 있다.

현재까지 조류나 방선균에 의해 생성되는 것으로 알려진 대표적인 이취물질은 geosmin과 2-MIB가 있으며, 이들은 각각 흙냄새와 곰팡이냄새를 발생시킨다. 특히 남조류인 *Anabaena* sp., *Oscillatoria* sp., *Phormidium* sp.이 우점할 때 이취미 물질들이 빈번히 발생한다고 알려져 있다. 그 이외의 이취미 물질에는 IPMP, IBMP, TCA 등이 있으며, 이취를 제거하기 위한 공정으로는 활성탄¹⁾²⁾이나 제올라이트³⁾⁴⁾, 분말활성탄을 이용한 흡착제거⁵⁾ 또는 후오존과 입상활성탄(GAC)을 이용하는 고도정수처리공정 및 다단식으로 오존을 투여하고 입상활성탄으로 흡착·제거하는 공정들을 많이 이용하고 있는 실정이다. 이와 같이 기존의 정수처리공정을 보완하기 위한 고도처리시설의 도입은 많은 투자비용이 소요되며, 입상활성탄의 일정한 성능유지를 위해 주기적인 교체비용도 상당하게 소요되고 있는 실정이다.

따라서 최근에는 고급산화법(Advanced Oxidation Process)에 대한 관심이 높아지고 있으며 이에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있다. 고급산화법은 기존의 산화제보다 월등한 산화력을 가지는 ·OH 라디칼을 생성시켜 오염물질을 제거하는 공법으로 UV/TiO₂, 오존/UV, 오존/과산화수소, 과산화수소/UV, Fenton 산화, Electron Beam Irradiation 등이 있다. UV/TiO₂ 공정에서는 300~400nm 정도의 자외선을 TiO₂에 조사하여 TiO₂ 표면에 ·OH 라디칼을 생성시켜 유기물을 제거하는

방법으로 비교적 적은 에너지를 이용하여 유기물을 제거할 수 있는 이점이 있으며, TiO₂의 강한 산화력은 보통의 방법으로 제거가 어려운 휘발성 유기활로젠 화합물, PCB, 다이옥신, 농약 등의 분해까지도 가능하다. 그러나 현재로는 수중에서의 반응효율이 매우 낮아 실용화 사례는 보기 드문 실정이며, 현재로 개발되어 있는 수중에서의 실용화 공정은 광촉매 분말을 현탁시키는 방법과 증공불을 이용한 방법 등이 있다.

TiO₂ 분말을 사용하여 목적대상 물질을 제거할 경우 자외선 에너지원으로 태양광을 이용할 수 있어 획기적으로 에너지를 절감할 수 있고, 촉매로 이용된 TiO₂ 분말을 재회수하여 사용하거나, 담체표면에 박막을 입혀 영구사용이 가능하여 이를 이용한 활용성이 넓어 자연 친화적인 공법으로 각광을 받을 수 있을 것으로 생각된다.

따라서 본 연구에서는 최근 많이 연구되고 있는 고급산화법의 일종인 UV/TiO₂를 사용하여 이취물질인 geosmin의 제거와 함께 정수공정에서 대표적인 산화제로 사용중인 오존에 의한 geosmin 산화능도 함께 비교하였으며, 이들에 의한 부산물 생성에 대하여도 조사하였다.

2. 문헌 연구

2.1. 광촉매반응 원리

TiO₂ 표면에 빛에너지를 조사하게 되면 TiO₂ 원자가띠(Valence Band)에 있는 전자가 전도띠(Conduction Band)로 전이되고 원자가띠에는 전자가 비어있는 양공(Positive Hole)을 남기게 된다. 이때 전자가 전이되는데 필요한 광에너지는 Bandgap에 해당하는 약 3.2eV 정도의 에너지가 필요하고, 390nm 이하의 파장이 이에 해당되며⁶⁾⁷⁾, 390nm 이하의 자외선을 조사하면 광화학 반응이 진행된다. 주요 반응 메커니즘을 Fig. 1에 나타내었다.

이 전자·양공을 표면에 노출시켜 오염물질과

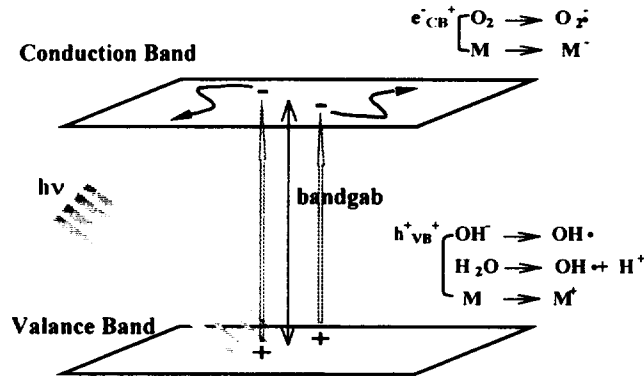


Fig. 1 Photocatalytic reaction mechanism.

반응시키면 산화·환원반응이 일어나게 되며 이것을 광촉매 반응이라고 한다. 이렇게 생긴 e^-_{CB} (Conduction Band에 전이된 전자), h^+_{VB} (Valence Band에 남은 positive hole)은 TiO_2 표면에서 확산·이동하게 되며, 확산된 h^+_{VB} 는 물속의 수산화이온과 반응해서 $\cdot OH$ 라디칼을 생성하고 또 물분자와 반응해서 $\cdot OH$ 라디칼과 H^+ 이온을 생성시키기도 하며 직접 유기물과 반응하여 산화시키기도 한다. e^-_{CB} 는 수중의 산소와 반응해서 Superoxide 라디칼(O_2^-)을 만들고 다시 이 Superoxide 라디칼은 Fig. 2와 같이 물분자와 반응해서 두 개의 OH 라디칼과 수산화이온 그리고 산소 한 분자를 만들거나 H^+ 와 반응하여 $HO_2\cdot$ 를 만들고 결국은 H_2O_2 를 생성⁶⁾해

이 H_2O_2 가 몇 가지 반응경로를 거쳐 $\cdot OH$ 라디칼을 만들게 된다⁷⁾⁸⁾. 400nm의 광자가 가지고 있는 에너지는 30,000℃ 이상의 열에너지에 해당되어 이와 같은 고온에서는 모든 유기물들이 바로 산화되어 CO_2 와 H_2O 로 분해된다.

2.2. TiO_2 powder의 특성

TiO_2 에는 고온(약 600℃ 이상)에서 안정한 rutile형의 침상형을 가진 것과 그 온도보다 저온에서 안정한 육각형의 anatase형이 있는데, 광촉매로서 높은 활성을 나타내는 것은 anatase형이다. 이는 rutile 표면에서 빠른 재결합 반응이 일어나고 표면에 달라붙는 반응

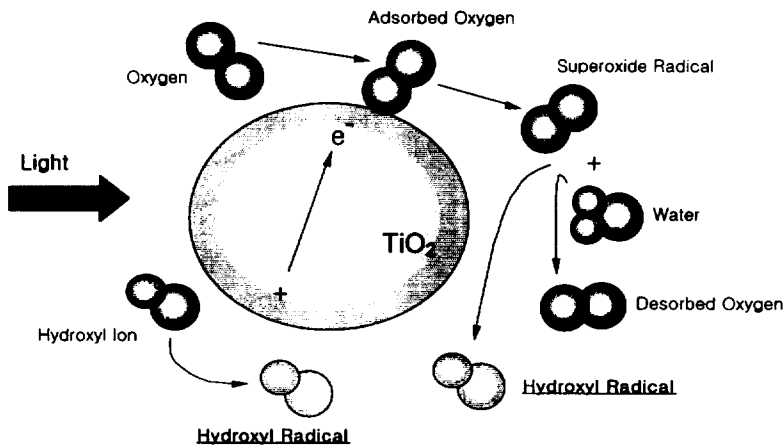


Fig. 2 Formation of radicals and reaction mechanism of TiO_2

물들의 수와 표면 위의 hydroxyl group의 양이 대조적으로 anatase형 보다 rutile에서 더 적기 때문에 anatase형이 광촉매로서 효율이 뛰어난 것으로 알려지고 있다. 본 실험에 사용된 TiO_2 분말(Across社, Titanium(IV) Oxide, 99% Anatase)의 특성을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Chemical and physical Properties of TiO_2 Powder

Item (Component)	Standard value
Bandgab energy	3.2 eV
Degree of purity(TiO_2)	99% minimum
Particle size	$0.3 \pm 0.05 \mu$
Matter soluble in water	0.7% maximum
Specific gravity	3.9
Residue (325mesh)	0.015% maximum
Fe_2O_3	0.008% maximum

3. 실험재료 및 방법

3.1. 실험 장치

3.1.1. 광촉매 반응기

광반응기는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 batch형으로 직경 30cm, 용량 4L의 원형 유리 반응기에 증류수 2L와 geosmin을 $10 \mu\text{g/L}$ 의 농도로 투여하고 30초간 자석교반기로 교반 후, 촉매인 TiO_2 분말을 현탁시켜 교반속도 120rpm으로 하여 실험하였다. 실험에 사용된 광원은 자외선살균램프(Sankyo Denki Co. Ltd., UV-Germicidal Lamp : 254nm)와 할로겐램프(Osram Co. Ltd., Halogen Lamp : 500nm)를 사용하였으며, 광원의 종류 및 분말상 광촉매의 투여량에 따른 광반응 효율을 비교하였다.

3.1.2. 오존 반응기

본 연구에서 사용된 오존접촉조는 Fig. 4에 나타난 바와 같이 반응기용량 20L의 bench

scale로 시료수 20L에 대해 geosmin을 $10 \mu\text{g/L}$ 의 농도로 오존접촉조에 채운 후, 오존을 연속적으로 접촉시킨 semi-batch reactor에서 수행하였으며 재질은 투명아크릴이며, 오존의 부식성에 대비하여 impeller는 SUS-316L로 제작하였다. 오존접촉조는 직경 18cm, 높이 100cm이며, 기·액접촉반응의 효율을 높이기 위해 저부에 원형 diffuser를 설치하여 주입되는 오존을 효과적으로 산기시켰다. 연결관은 부식 및 오존과의 반응을 고려하여 실리콘 관을 사용하여 가능한 짧게 연결하였다. 반응기 상단에는 배가스 배출구를 설치하였으며, 오존 발생장치(Ozonizer, EO-302, Okano works, Japan, sources oxygen, density 1% 이상)는 무성 corona 방전방식으로 99% 고순도 산소를 주입하여 오존을 발생시킨 후, 반응조 내로 공급되는 오존량은 1.42mg/sec 로 하여 실험을 하였다.

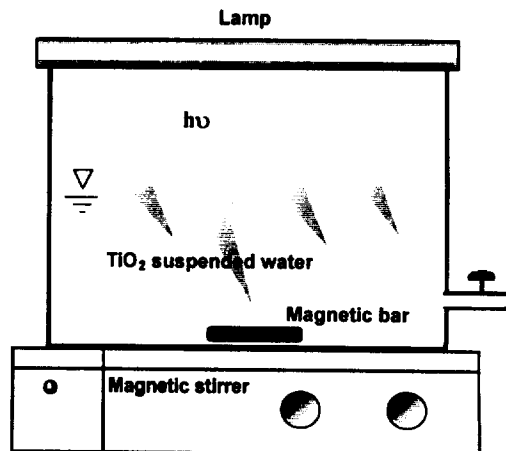


Fig. 3 Schematic diagram of the photocatalytic apparatus.

3.2. 실험 방법

Geosmin 표준용액(geosmin 2mg/ml in MeOH, SIGMA, Lot 16H3828)을 micro-syringe를 이용하여 $10 \mu\text{g/L}$ 의 농도로 Milli-Q 증류수제조장치로 제조한 증류수에 희석하여 실험에 사용하였다. 광촉매로 사용된 TiO_2 분말은 $0 \sim 200 \text{mg/L}$ 의 농도로 하여 실험

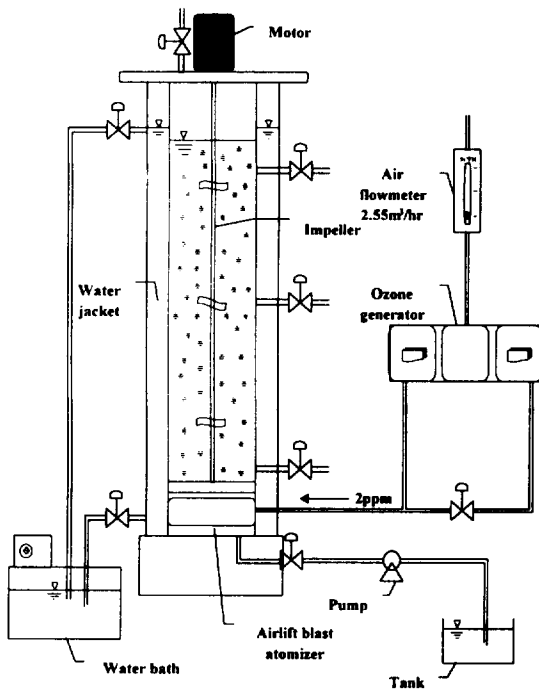


Fig. 4 Schematic diagram of ozonation apparatus.

험하였으며, 실험에 사용된 광원은 10W-자의 선살균램프와 50W-할로겐램프를 사용하여 광원의 종류와 TiO_2 분말농도에 따른 geosmin 제거능을 조사하였다.

분말 TiO_2 의 현탁질에 의한 geosmin의 물

리적 흡착량을 조사하기 위하여 광반응 480분 동안 TiO_2 분말을 회수하여 GF/C 여지로 여과하여 여지에 남은 TiO_2 분말을 50ml의 증류수로 세척한 후 그 여액을 Purge & Trap 장치와 GC/MSD(I)를 이용하여 잔류농도를 확인하였으며, 마지막으로 GF/C 여지 위에 남은 TiO_2 분말을 geosmin에 대한 회수율이 가장 높은 유기용제인 MTBE¹⁰⁾(tert-Buthylmethylether)로 추출·농축하여 GC/MSD(II)로 확인하였다. 또한, 광촉매 산화반응과 오존 산화반응을 비교하기 위해서 오존접촉조에서의 geosmin 분해능을 조사하였으며, 생성 부산물에 대한 조사도 실시하였다. 오존접촉조내로 공급되는 가스상의 오존농도는 KI법에 의해 분석하였으며, 반응기내 잔류오존 농도는 Indigo법에 의해 분석하였다. Geosmin과 생성부산물 측정을 위한 분석기기의 조건을 아래의 Table 3과 4에 나타내었다.

4. 결과 및 고찰

4.1. pH 변화

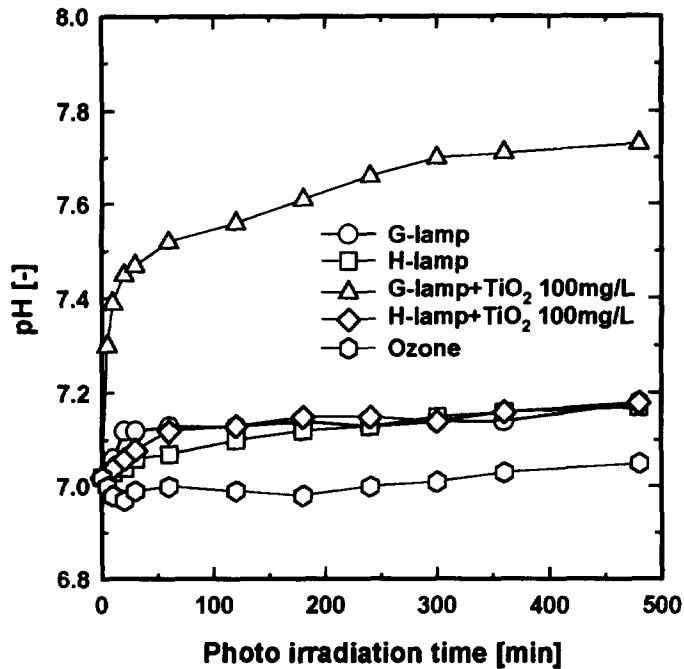
Geosmin을 $10\mu\text{g/L}$ 의 농도로 투여한 광촉매반응기와 오존접촉조에서의 pH 변화를 Fig.

Table 3 The analytical conditions of GC/MSD [1] and Purge & Trap for VOCs

GC/MSD
- GC : Varian Star 3400CX
- MSD : Varian Saturn 2000, EI mode
- Column : DB-5MS, 60m×ID 0.25 mm×0.25 μm
- Oven Temp. : Hold 10min at 40°C
- 1st rate 5°C to 150°C, 2nd rate 4°C to 250°C
Purge & Trap
- Tekmar LSC-3000 Purge and Trap Concentrator
- Purge Time : 8 min
- Trap : # J (VOCARB 4000), Desorb 4min(260°C), Bake 5min(260°C)

Table 4 Analytical Conditions of the GC/MSD [11] for SOCs

-
- GC : HP 5890 series II
 - MSD : HP 5972A, EI mode
 - Column : Ultra-1 50m × ID 0.20mm × 0.11 μ m
 - Oven Temp. : Initial Temp. 40 $^{\circ}$ C, Hold 10min,
 - 1st rate 6 $^{\circ}$ C to 120 $^{\circ}$ C, 2nd rate 5 $^{\circ}$ C to 250 $^{\circ}$ C
-

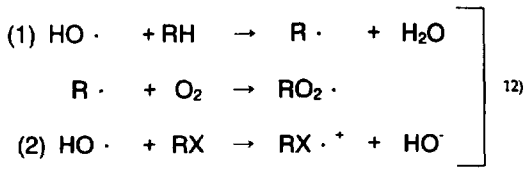
Fig. 5 pH changes in aqueous with and without TiO₂ suspension by photo irradiation.

5에 나타내었다. 오존을 접촉시킨 경우의 pH 변화는 반응시간 480분 동안 큰 변화를 보이지 않았으며, 광반응기에서 할로겐램프(H-Lamp)와 자외선살균램프(G-Lamp)로 촉매투입 없이 빛만을 조사했을 때 pH의 변화는 두 램프 모두 접촉시간 480분 동안 거의 변화를 보이지 않았다.

TiO₂ 분말을 첨가한 경우에는 할로겐램프를 광원으로 사용한 TiO₂분말(H+TiO₂ 100mg/L)의 광반응에서는 빛을 장시간 조사하여도

pH의 변화는 거의 없었다. 이는 일정한 빛 파장의 범위(400nm 이하)에서만 TiO₂의 광촉매 효과가 발생되기 때문으로 할로겐램프의 빛파장의 범위에서는 광촉매 효과가 유도되지 않는 것을 알 수 있다. 그러나 TiO₂분말+자외선살균램프(G+TiO₂ 100mg/L)의 경우 초기 pH 7.0에서 광조사 시간이 길어질수록 점차 증가하다 반응시간 360분 이후부터는 거의 변화가 없었다. 이는 생성된 OH 라디칼이 수중에 존재하는 유기물들과 반응하여 OH⁻로 전환되기

때문이며, 일정 pH 이상에서는 OH 라디칼의 생성과 소모가 평형상태가 되어 pH 상승폭이 둔화되거나 변화가 없지며¹¹⁾, 자외선살균램프를 광원으로 사용하는 경우에 OH 라디칼의 생성이 가장 많음을 알 수 있다. OH 라디칼 생성량이 많을수록 pH가 상승한다. 이것은 OH 라디칼이 지속적인 산화반응에 의해 OH⁻ 이온으로 산화되기 때문인 것으로 판단되며, OH⁻의 생성기전을 Scheme I에 나타내었다.



Scheme I

4.2. Geosmin의 산화

4.2.1. 광원의 종류에 따른 geosmin의 산화능 비교

광원의 종류에 따른 geosmin의 제거특성을 Fig. 6에 나타내었다. 자외선살균램프만 조사한 경우에도 광을 조사한 시간에 따라 geosmin이 약 77% 정도 제거됨을 알 수 있었으나, 할로겐램프만 조사한 경우에는 약 9.9% 정도의 근소한 제거능을 나타냄을 알 수 있었다.

UV광선이 매체에 조사되면 일차적으로 매체에 의해 흡수되어 그 분자나 원자를 자극시키며, 이 자극에 필요한 에너지는 파장 200~800nm의 적외선 및 자외선 영역에서 약 1.5~6.1eV인데, 이는 여러 종류의 분자결합을 깨뜨리는데 필요한 에너지보다 크다. 이 UV에 의해 자극을 받은 분자는 깨어지거나 깨어지기 쉬운 형태로 바뀌게 된다¹³⁾. 따라서 UV광만으로도 geosmin에 대한 어느 정도의 산화능이 있는 것으로 판단되었으며, 할로겐램프보다 자외선살균램프의 빛파장이 geosmin의 결합을 깨뜨리는데 더욱 효과적임을 알 수 있었다.

TiO₂ 분말 100mg/L를 첨가한 광원의 종류에 따른 geosmin 제거능 비교에서는 할로겐

램프(H-lamp/TiO₂ 100mg/L)의 경우 고열과 강렬한 빛을 발생(18,500 Lux)시켜 반응시간 동안 시료수의 수온(20℃→43℃)을 상승시킬 뿐 geosmin의 분해는 480분 후에도 32% 정도의 낮은 제거율을 보였다. 이와는 반대로 TiO₂ 분말 100mg/L를 첨가한 자외선살균램프(G-lamp/TiO₂ 100mg/L)의 경우는 광반응 60분 경과 후 88%, 360분 후 99%, 420분 후 완전히 제거되었다. 광촉매로 사용된 TiO₂는 400nm 이하의 빛파장에 의해 활성을 나타내어 강력한 산화력을 지닌 OH 라디칼을 생성함으로 geosmin의 제거율은 서로 다른 파장을 지닌 광원의 차이에 기인한 것으로 사료되며, 할로겐램프보다 자외선살균램프가 분말 TiO₂의 광활성 유도에 더욱 적합한 것으로 사료되었다.

4.2.2. TiO₂ 분말의 첨가량에 따른 geosmin 제거능 비교

TiO₂ 분말의 첨가량에 따른 geosmin의 제거능을 비교하기 위해 광반응에 적합한 자외선 살균램프를 조사시키고 용액 중에 TiO₂ 분말을 0, 100, 200mg/L의 농도로 첨가하여 geosmin 제거능을 비교한 결과를 Fig. 7에 제시하였다.

광촉매로 사용된 TiO₂ 분말의 첨가량이 많아질수록 geosmin의 제거효율이 향상되는 것을 볼 수 있으며, TiO₂ 분말의 첨가량이 200mg/L일 때 반응 5분 후 72%의 제거율을 보였으며, 30분 후 94%, 300분에는 거의 제거되었다. 따라서, TiO₂ 분말의 첨가농도 200mg/L까지는 자외선이 시료수의 매질을 통과하여 광촉매 산화반응을 유도시키는데 아무런 방해작용을 나타내지 않는 것을 알 수 있었으며, TiO₂ 분말의 첨가농도와 광촉매 산화반응효율과의 관계는 앞으로 더욱 연구되어져야 할 것으로 사료된다.

4.2.3. 광촉매와 오존의 산화능 비교

현재 산화공정에서 대표적인 산화제로 사용 중인 오존을 이용하여 광촉매 산화능과 오존에

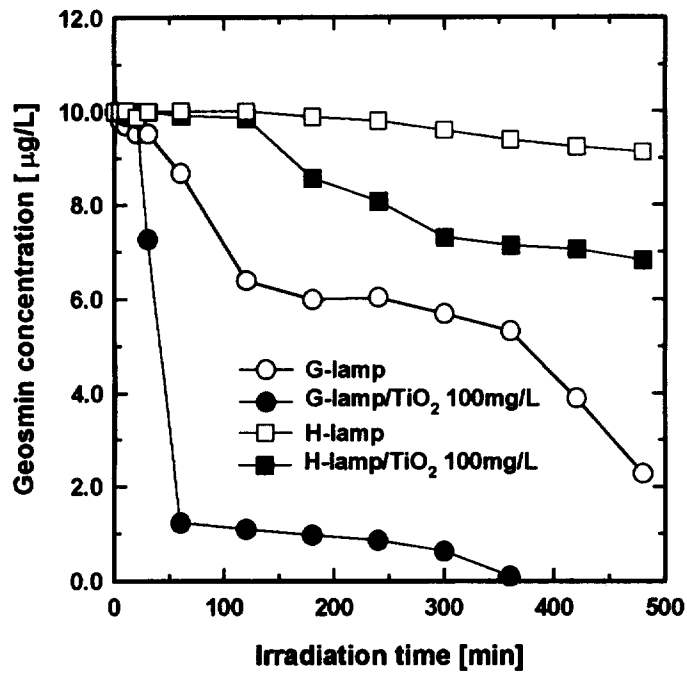


Fig. 6. The rate of reduced geosmin concentration by photo oxidation.

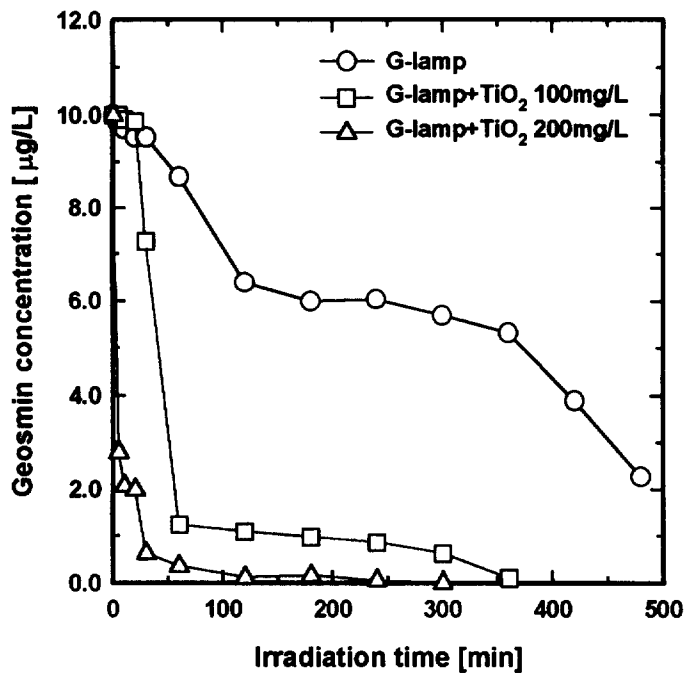


Fig. 7 The rate of reduced geosmin concentration by photocatalytic oxidation.

의한 geosmin의 산화능을 Fig. 8에 비교하였다. 오존은 2mg/L의 농도로 오존접촉조내로 주입시켰으며 광산화 반응에서는 TiO₂ 분말을 200mg/L의 농도로 반응기에 첨가하여 실험하였다.

반응 초기 20분까지는 TiO₂ 200mg/L를 첨가한 광촉매 산화반응의 산화능이 조금 높게 나타났으나, 30분 후에는 광분해에 의한 산화능과 오존에 의한 산화능이 거의 비슷한 경향을 나타내었다.

4.2.4. TiO₂ 분말에 의한 geosmin 흡착량

분말 TiO₂에 의한 geosmin의 산화에서 광촉매 산화반응에 의한 제거가 아닌 물리적 흡착에 의한 geosmin 제거를 조사하기 위하여 분말 TiO₂ 200mg/L의 농도에서 자외선살균 램프를 조사하면서 광반응 시간별로 TiO₂ 분말을 회수하여 증류수로 세척하여 GF/C 여지로 여과한 후 세척액을 Purge & Trap 전처리 장치가 구비된 GC/MSD(I)으로 확인하였으며, GF/C 여지에 남은 TiO₂ 분말을 geosmin에 대한 회수율이 가장 높은 유기용제인

MTBE¹⁰⁾를 사용하여 추출·농축하여 GC/MSD(II)로 확인한 결과 geosmin이 모두 검출되지 않아 TiO₂ 표면에서의 geosmin의 물리적 흡착은 일어나지 않는 것으로 평가되었다.

4.3. 광촉매와 오존 산화반응에 의한 생성 부산물 조사

4.3.1. 오존산화에 의한 생성부산물 조사

오존 산화반응에 의한 부산물의 생성에 대한 TIC(Total Ion Chromatogram)을 Fig. 9에 나타내었다. 오존은 직접반응과 OH 라디칼에 의한 간접적인 두 가지 방식으로 유기물산화에 관여하는데, 직접반응에 의해 생성된 것으로 판단되는 3-Heptanone과 대표적인 오존산화 부산물로 알려진 Heptanal, 2-Dodecenal과 같은 2종의 알데히드류¹⁴⁾, 그리고 6-Hepten-1-ol, 3-methyl, 1-Hexene-3-ol, Cyclo-dodecanol과 같은 3종의 알콜류 생성이 두드러지게 나타남을 확인할 수 있었으며, 피크(a)와 같은 미확인 물질은 분석시 염색제로 첨가한 NaCl 및 기기 칼럼에서 용출된 물질인 것

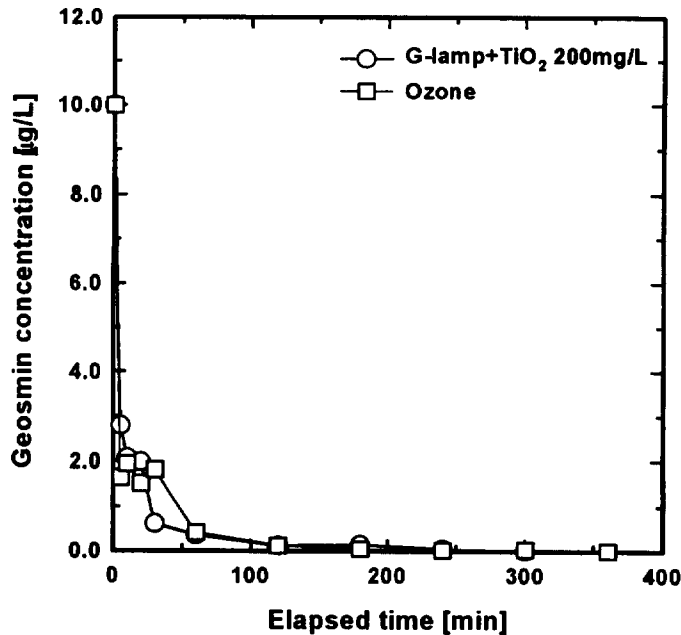


Fig. 8 The rate of reduced geosmin concentration by ozonation and photocatalytic oxidation.

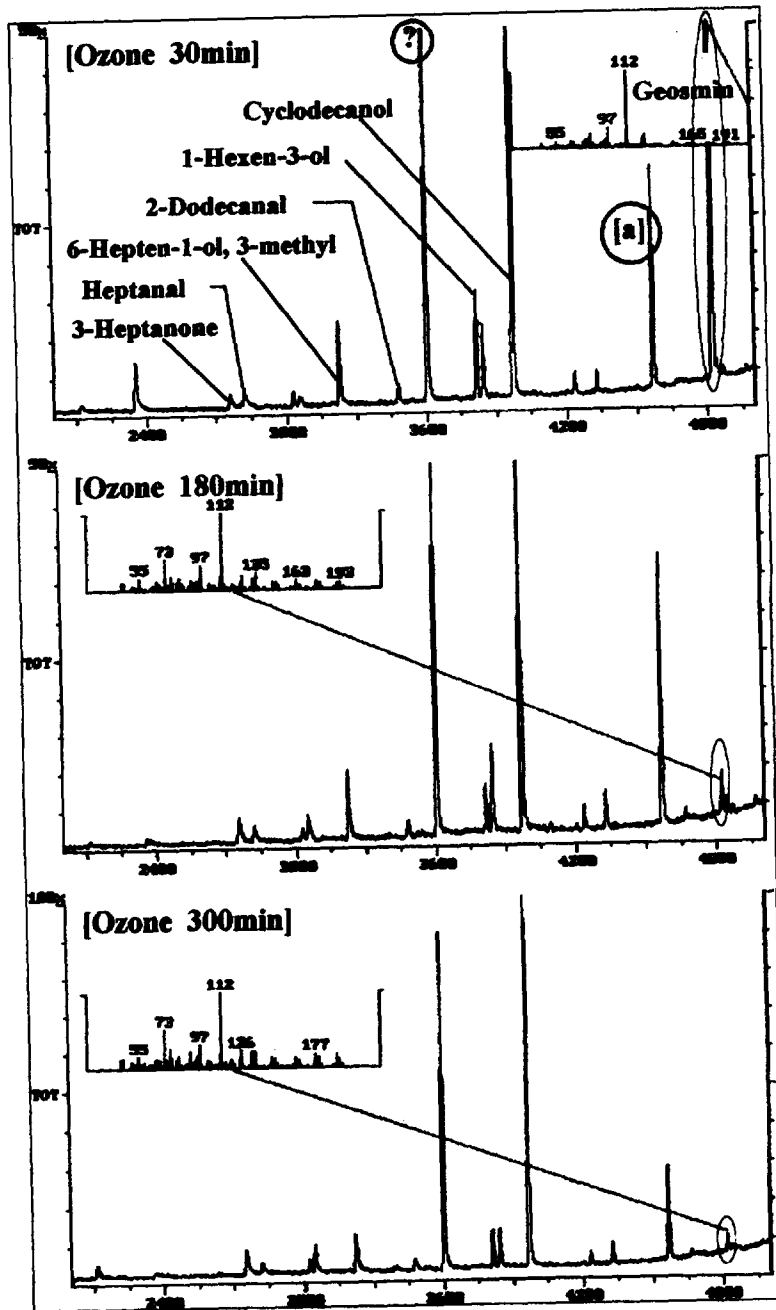


Fig. 9 TIC of ozonation for removal of geosmin and generated by-products.

으로 추측된다.

4.3.2. 광촉매 반응에 의한 생성부산물 조사

광촉매 산화반응에 의한 부산물 생성여부를 반응초기부터 종결되는 시점까지 조사한 결

과를 Fig. 10에 나타내었다. 광반응에 의한 부산물 생성은 염색제의 영향으로 고려되는 피크 (a)와 기기 칼럼에서 용출되는 물질인 것으로 추측되는 2종의 미확인 물질을 제외하고는 확인되지 않아 오존을 투여한 경우와 대비가 됨

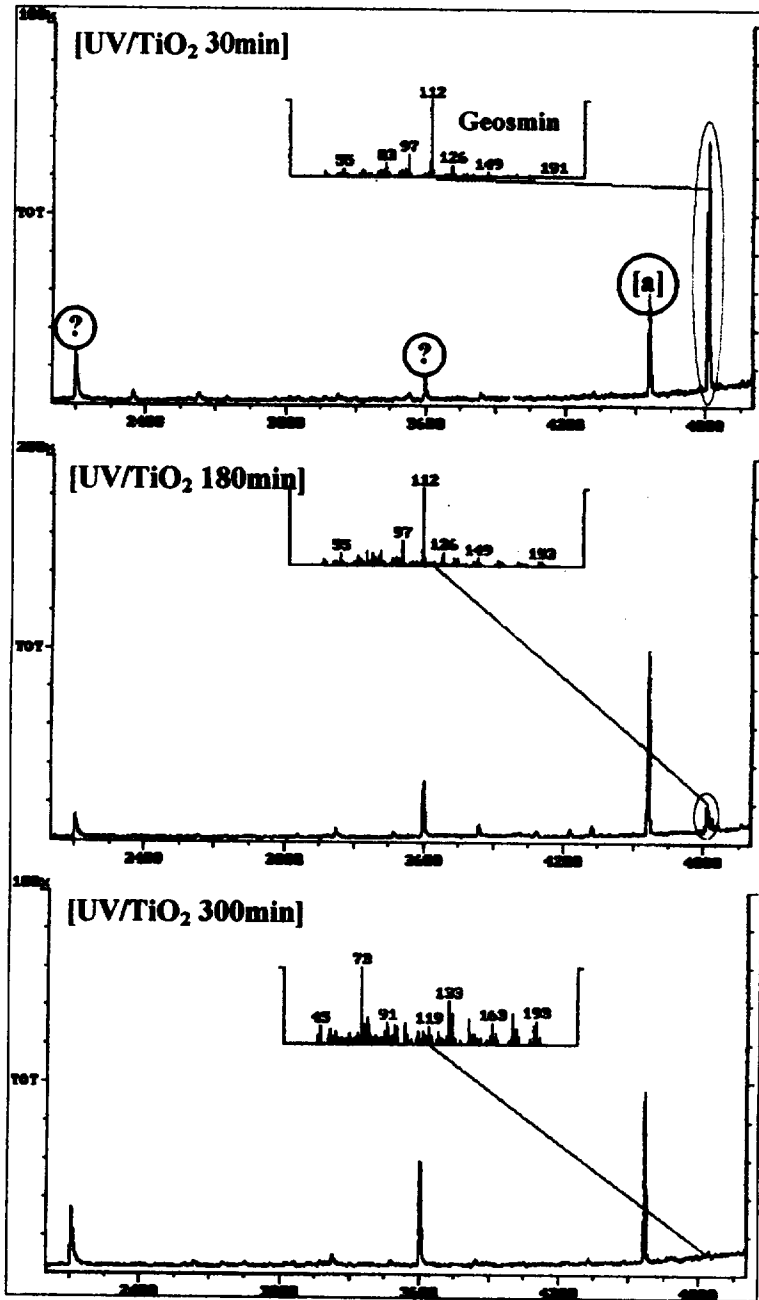


Fig. 10 TIC of Photocatalytic degradation for removal of geosmin and genertated by-products.

을 알 수 있다. 이는 TiO₂의 표면에서 발생하는 강력한 ·OH 라디칼에 의해 geosmin과 수중에 공존하고 있는 여러 가지 유기물들이

중간분해단계를 거치지 않고 CO₂와 H₂O로 직접 무기화되기 때문에 부산물이 생성되지 않은 것으로 사료되었다.

5. 결론

오존산화와 TiO₂ 광촉매 반응에 의한 geosmin의 제거 및 부산물 생성특성에 대하여 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. Geosmin과 함께 오존을 접촉시킨 경우의 pH 변화는 반응시간 동안 큰 변화를 보이지 않았으며, 광반응기에서 촉매투입 없이 빛만을 조사했을 때는 할로겐램프와 자외선살균램프 모두 접촉시간 480분 동안 거의 변화를 보이지 않았다. 촉매를 투입한 경우에는 광원으로 자외선 살균램프를 사용한 경우만이 pH 증가현상을 나타내었다.

2. 광원의 종류에 따른 geosmin의 제거특성을 보면 자외선살균램프만 조사한 경우에도 광 조사 시간에 따라 geosmin이 약 77% 정도 제거됨을 알 수 있었으나, 할로겐램프만 조사한 경우에는 약 9.9% 정도의 근소한 제거능을 나타냄을 알 수 있었다.

3. 광촉매로 사용된 TiO₂ 분말의 첨가량에 따른 geosmin 제거능 비교에서는 첨가량이 0에서 200mg/L의 농도로 증가할수록 비례하여 geosmin의 제거효율이 향상되는 것을 볼 수 있었다.

4. 광촉매 산화능과 오존에 의한 geosmin의 산화능의 비교에서는 반응 초기 20분까지는 TiO₂ 200mg/L를 첨가한 광촉매 반응의 산화능이 조금 높게 나타났으나, 30분 후에는 광촉매에 의한 산화능과 오존에 의한 산화능이 거의 비슷한 경향을 나타내었다.

5. 오존 산화반응과 광촉매 산화반응에 의한 부산물 생성에 대한 조사에서는 오존 산화반응에서는 직접반응에 의해 생성된 것으로 판단되는 3-Heptanone과 2종의 알데히드류, 그리고 알콜류 3종 등의 생성이 두드러지게 나타남을 확인할 수 있었으며, 광촉매 산화반응에 의한 생성부산물은 확인할 수 없었다.

References

1. Craig, S. L., Pirbazari, M., Dale, M. S., Tanaka, T., and McGuire, M. J., Optimizing the Removal of Geosmin and 2-MIB by Powdered Activated Carbon, *J. Am. Wat. Wks. Ass.* 80, 73-76 (1988).
2. Tanaka, A. and Fuchigami, K., Biodegradation of a Musty Odor Compounds 2-Methyl-isoborneol and Geosmin, *Wat. Res.*, Vol. 30, 759-761 (1996).
3. Ellis, J. and Korth, W., Removal of Geosmin and Methylisoborneol from Water by Adsorption on Ultrastable Zeolite-Y, *Wat. Res.*, Vol. 27, 535-537 (1993).
4. Derouane, E. G., Guidelines for Mastering the Properties of Molecular sieve, Plenum Press, New York (1990).
5. De Jonge, R. J. and Van Andel, J. G., Biodegradation of Powdered

- Activated Carbon(PAC) Loaded with Aromatic Compounds, *Wat. Res.*, Vol. 30, 875-878 (1996).
6. Hussain, A. E., Ali, S. A., Joan, S., and Wendy, S., Advanced Technology for Destruction of Organic Pollutants by Photocatalysis, in *Proceedings of a Symposium on Advanced Oxidation Processes*, Toronto, Canada, June, 4-5 (1990).
 7. Craig, S. T. and David, F. O., Photocatalytic Degradation of Organic Water Contaminants : Mechanisms involvin Radical Attack, *Journal of Catalysis*, Vol. 122, 178-192 (1990).
 8. Calvin, D. J. and Allen, J. B., Spin Trapping and Electron Spin Resornance of Radical Intermediates in the Photodecomposition of Water at TiO₂ Particulate System, *J. Phy. Chem.*, Vol. 83, No. 24, 3146-3152 (1979).
 9. Ashitani, K., Hishida, Y., and Fujiwara, K., Behavior of Musty Odorous Compounds during the Process of Water Treatment, *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 20, 261 (1988).
 10. 손희종, 조이규, 정철원, 배효무, 이수애, 흡착제를 이용한 수중의 미량이취물질 분석법 개발에 관한 연구, 부산수질연구소 상수도연구보 제 4집 (1998).
 11. 강준원, 오존, 과산화수소, UV를 이용한 고급산화처리 공정의 kinetic에 관한 연구 (I), *대한환경공학회지*, 제 12권, 제 2호, 501-510 (1993).
 12. Legrini, O., Oliveros, E., and Braun, A. M., Photochemical Processes for Water Treatment, *Chem. Rev.* Vol. 93, 671-698 (1993).
 13. Schulz, J. P., Analysenverfahren mit UV-photobiologische UV-Wirkungen, medizinische und kosmetische UV-Behandlung, UV-Entkeimung von Wasser, Luft etc., Technische Akademie Esslingen Weiterbildungszentrum, Lehrgang Nr.13656/43.127, UV-Strahlung- Erzeugung, Messung und Anwendungen, 11-12. Mar. (1991).
 14. Phlip, C. S., Assessing ozonation research needs in water treatment, *Journal of AWWA*, Vol. 82, No. 10, 78 (1990).