

오존처리에 의한 수중의 인공 사향물질 제거특성 Removal Characteristics of Synthetic Musk Compounds in Water by Ozone Treatment

서창동 · 손희종[†] · 염훈식 · 이상원 · 류동춘
Chang-Dong Seo · Hee-Jong Son[†] · Hoon-Sik Yoom · Sang-Won Lee · Dong-Chun Ryu

부산광역시 상수도사업본부 수질연구소
Water Quality Institute, Busan Water Authority

(2012년 1월 4일 접수, 2012년 2월 24일 채택)

Abstract : In this study, three different synthetic musk compounds (SMCs) in the Nakdong river water (raw water) and rapid sand filtered water were treated by O₃ process. The experimental results showed that the removal efficiency of musk ketone (MK) was lower than removal efficiency of AHTN (7-acetyl-1,1,3,4,4,6-hexamethyl-1,2,3,4-tetrahydronaphthalene) and HHCB (1,3,4,6,7,8-hexahydro-4,6,6,7,8,8-hexamethylcyclopenta[c]-2-benzopyran) for both the raw water and the rapid sand filtered water. And in general, the removal efficiencies of three SMCs in the raw water were lower than that in the sand filtered water. Under the O₃ dose of 0.5~10.0 mg/L, the removal rate constants (k) of three SMCs for the raw and sand filtered waters increased rapidly with the increased O₃ dose. In the case of drinking water treatment plants (DWTPs) which were selected pre- and post-O₃ processes (located in the downstream of Nakdong River), operation conditions of pre- and post-O₃ process were 0.5~2.0 mg·O₃/L (2~4 min) and 0.5~2.5 mg·O₃/L (6~8 min). Therefore, O₃ doses and contact times of same post conditions with above were very difficult to remove SMCs in DWTPs.

Key Words : Synthetic Musk Compounds (SMCs), MK, AHTN, HHCB, Ozone Treatment, Half Life (t_{1/2})

요약 : 낙동강 원수와 급속 사여과 처리수중에 함유된 인공 사향물질(Synthetic Musk Compounds, SMCs) 3종에 대해 오존처리 공정에서의 제거특성을 살펴본 결과, Musk Ketone (MK)이 AHTN (7-acetyl-1,1,3,4,4,6-hexamethyl-1,2,3,4-tetrahydronaphthalene)과 HHCB (1,3,4,6,7,8-hexahydro-4,6,6,7,8,8-hexamethylcyclopenta[c]-2-benzopyran)에 비해 오존처리에 의한 제거율이 낮게 나타났다. 그리고 동일한 운전조건에서 원수에 함유된 SMCs의 제거율은 원수 중에 함유된 오존 소모물질들에 의한 영향으로 급속 사여과 처리수에 함유된 경우보다 제거율이 훨씬 낮았다. 오존 투입농도 0.5~10.0 mg/L에서 낙동강 원수와 급속 사여과 처리수 중에 함유된 3종의 SMCs에 대한 제거 속도상수(k)는 오존 투입농도가 증가할수록 급격히 증가하는 경향을 나타내었고, 반감기 역시 오존 투입농도 증가에 비례하여 급격히 감소하였다. 전/후오존 공정이 갖추어진 낙동강 하류에 위치한 정수장들의 경우, 전오존 공정은 최대 1.5~2.0 mg/L의 오존 투입농도로 2~4분 및 후오존 공정은 최대 2.0~2.5 mg/L의 오존 투입농도로 6~8분 정도의 체류 시간을 가지도록 설계되어 있어 비교적 고농도의 SMCs가 유입될 경우에는 오존처리만으로는 이들 물질들에 대한 제거가 어려운 것으로 나타났다.

주제어 : 인공 사향물질, MK, AHTN, HHCB, 오존처리, 반감기

1. 서론

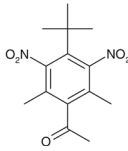
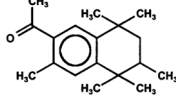
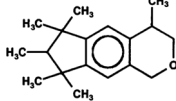
최근 생활용품이나 개인위생용품에 제품의 향을 내기 위해 첨가되는 인공 사향물질(Synthetic Musk Compounds, SMCs)은 환경 중에서의 높은 잔류성과 생물들에 대한 잠재적 위험성으로 인해 새로운 유해물질(Emerging contaminants)로 부각되고 있다.¹⁾ 이들은 사향의 향을 가진 물질들로 다양한 생활용품이나 개인위생용품의 향기를 만드는 물질로 사용되며, 향수, 화장품뿐만 아니라 면도용 크림, 샴푸, 비누, 탈취제 등과 같은 개인위생용품, 섬유 유연제, 세제, 공기 정화제 및 가정용 세정제에 이르는 다양한 가정용품에 첨가제로 사용되고 있다.²⁾ 인공 사향물질은 크게 염화(Nitro) 사향과 다환(Polycyclic) 사향으로 분류되며, 염화 사향류에는 musk ambrette, musk ketone, musk moskene, musk xylene 등이 있고, 다환 사향류에는 HHCB (1,3,4,6,7,8-hexa-

hydro-4,6,6,7,8,8-hexamethylcyclopenta[c]-2-benzopyran), AHTN (7-acetyl-1,1,3,4,4,6-hexamethyl-1,2,3,4-tetrahydronaphthalene), ADBI (4-acetyl-1,1-dimethyl-6-tert-butyl-indane), AHMI (6-acetyl-1,1,2,3,3,5-hexamethylindane), ATII (5-acetyl-1,1,2,6-tetramethyl-3-isopropylindane) 및 DPMI (6,7-dihydro-1,1,2,3,3-pentamethyl-4(5H)-indanone) 등이 있으며,³⁾ 전 세계적으로 염화 사향물질들이 전체 사용량의 12% 정도를 차지하고 있으며, 다환 사향물질들은 85% 이상을 차지한다.⁴⁾

수환경에서의 SMCs 분포에 대한 연구결과들에 따르면 하수처리장의 방류수에서 비교적 높은 농도로 검출되기 때문에 하수처리장 방류수가 가장 큰 오염원이며, 인구가 많은 대도시 부근에서 높은 농도로 검출되는 것으로 보고되고 있다.⁵⁻⁷⁾ 국내에서는 서 등⁸⁾이 낙동강 수계를 중심으로 분류 및 지류 등에서 11종의 SMCs 분포현황을 조사한 연구결과에서 HHCB, AHTN 및 MK가 각각 N.D.~1445.4 ng/L, N.D.~

[†] Corresponding author E-mail: menuturk@hanmail.net Tel: 051-669-4635 Fax: 051-669-4669

Table 1. Physico-chemical chemical properties of the nitro and polycyclic musks used in this study

Compounds	Trade name	CAS No.	M.W.	Chemical structure	Molecular formula	Log <i>Kow</i>
<i>Nitro musks</i>						
Musk ketone	-	81-14-1	294.3		C ₁₄ H ₁₈ N ₂ O ₅	4.3 ¹⁶⁾
<i>Polycyclic musks</i>						
AHTN	Tonalide [®]	1506-02-1	258.4		C ₁₈ H ₂₆ O	5.7 ¹⁷⁾
HHCB	Galaxolide [®]	1222-05-5	258.4		C ₁₈ H ₂₆ O	5.9 ¹⁷⁾

137.2 ng/L 및 N.D.~562.7 ng/L의 비교적 높은 농도범위로 검출되었다고 보고하였다.

최근 정수처리 분야에서는 분석기술의 발달로 인해 다양한 유기성 미량오염물질들이 강이나 호소와 같은 상수원수에서 검출되어 정수처리 공정에서 이들의 거동에 대한 연구들이 많이 이루어지고 있다.^{9,10)} SMCs와 같은 유기성 미량오염물질들은 응집-침전-여과와 같은 기존 정수처리 공정에서의 제거능이 아주 낮기 때문에 오존과 같은 강력한 산화력을 지닌 산화제를 이용한 연구가 많이 진행되고 있다.¹¹⁻¹⁴⁾ 오존은 분자오존에 의한 직접반응과 OH 라디칼에 의한 간접반응에 의해 수중의 유기성 미량오염물질들을 효과적으로 제거하지만 pH, 알칼리도 및 수중의 Natural Organic Matter (NOM) 특성과 같은 유입수의 성상에 따라 산화효율에 많은 차이를 나타낸다.¹⁵⁾

본 연구에서는 낙동강 수계의 하류에 위치한 정수장으로 유입될 가능성이 있는 HHCB, AHTN 및 MK에 대해 오존 공정을 이용하여 전오존 및 후오존 공정에서의 제거효율을 파악하고자 낙동강 매리원수와 급속 사여과 처리수를 이용하여 오존 투입농도 및 접촉시간별 제거특성과 산화 동력학적 평가를 통하여 정수장 운영의 기초자료로 활용하고자 하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 실험재료

2.1.1. 표준물질 및 시료수 조제

실험에 사용된 SMCs 표준물질은 염화 사향류인 musk ketone (MK) 1종과 다환 사향류인 AHTN과 HHCB 2종을 독일의 Dr. Ehrenstorfer사에서 구입하여 분석 및 오존접촉 실험에 사용하였으며, internal standard와 recovery standard로는 musk xylene (MX)-*d*₁₅과 phenanthrene-*d*₁₀을 Dr. Ehrenstorfer사에서 구매하여 실험에 사용하였다. 시료수 중에 함유

된 인공 사향의 추출에 사용된 용매는 HPLC용 등급의 dichloromethane (Merck)과 *n*-hexane (Merck)을 사용하였으며, 무수황산 나트륨(anhydrous sodium sulfate, Merck)은 사용하기 전에 450°C에서 전처리(baking)한 후 실험에 사용하였다.

시료수는 낙동강 매리지역의 원수(raw water)와 매리원수를 정수처리하는 pilot-plant의 급속 모래여과 처리수(rapid sand filtered water)에 염화사향류인 musk ketone (MK) 1종과 다환 사향류인 AHTN 및 HHCB 2종을 각각 1,000 ng/L의 농도로 투입하여 오존접촉 실험을 하였다. 초기 투입농도를 1,000 ng/L로 선정한 이유는 낙동강 수계에서 SMCs 분포 현황을 조사한 서 등⁸⁾의 연구결과에서 HHCB가 최대 1445.4 ng/L의 농도로 검출된 것으로 보고하고 있어 MK, AHTN 및 HHCB 3종 각각의 초기농도를 1,000 ng/L로 하여 실험하였다. 실험에 사용된 매리원수와 급속 모래여과 처리수의 성상을 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Characteristics of raw- and rapid sand filtered water

Item	pH (-)	DOC (mg/L)	UV-254 (cm ⁻¹)	Turbidity (NTU)	Alkalinity (mg/L CaCO ₃)
raw water	7.6	3.02	0.0583	12.4	58
sand filtered water	7.1	1.62	0.0221	0.2	35

2.1.2. 오존 접촉조

실험에 사용된 오존 접촉조의 모식도를 Fig. 1에 나타내었다. 접촉조는 10 L 용량의 아크릴 재질로 시료수를 채운 후 오존을 연속적으로 공급하는 semi-batch 식이다. 접촉조는 직경 10 cm, 높이 150 cm이며, 기·액 접촉반응의 효율을 높이기 위해 하부에 diffuser를 설치하여 주입되는 오존을 효과적으로 산기시켰으며, 연결 tube는 부식 및 오존과의 반응을 고려하여 실리콘 tube를 사용하였다. 오존 발생장치는 OZAT[®] CFS-1A(Ozononia, Switzerland)를 이용하였으며, 오존 투입농도를 측정하기 위하여 오존 모니터(PCI Ozone & Control System Inc., U.S.A.)를 설치하였다.

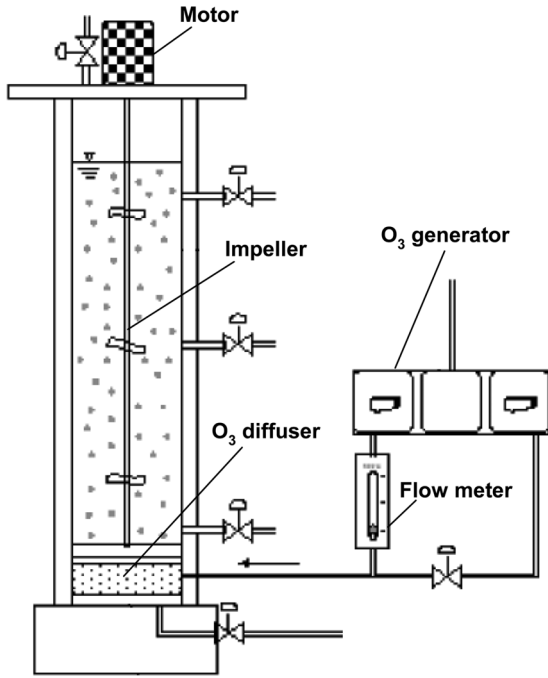


Fig. 1. Schematic diagram of ozone contactor.

2.2. 실험방법

2.2.1. 오존 접촉실험

오존 접촉은 20분간 수행하였으며, 시료수 10 L에 0.025~0.5 mg/L·min으로 20분간 오존을 주입하였으며, 20분간 주입된 오존량은 각각 5~100 mg으로 주입된 오존농도로 환산하면 0.5~10 mg/L이다. 또한, 채수한 시료수는 수중의 잔류 오존을 제거하기 위해 Na₂S₂O₃ (Junsei Chemical, Japan)를 이용하여 잔류오존을 고정화 후 분석에 사용하였다.

2.2.2. 인공사향물질 전처리 및 분석^{8,18)}

시료 200 mL를 500 mL 용량의 분액여두에 분취하여 in-

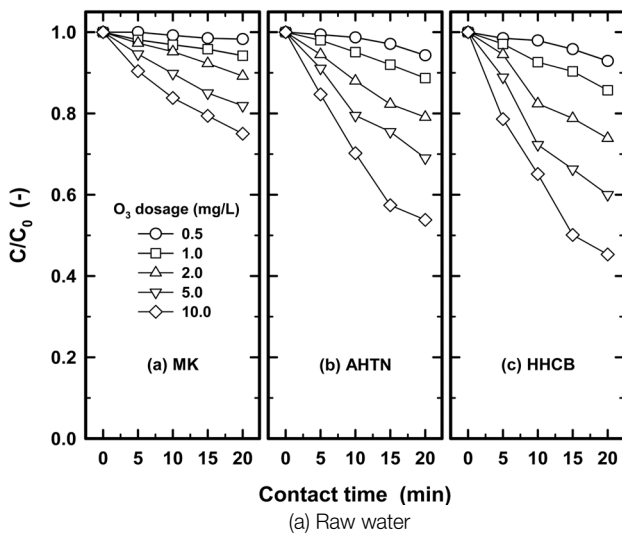


Table 3. Analytical conditions of the GC/MSD^{8,18)}

GC

- Column: 30 m (L) × 0.32 mm (ID) × 0.25 μm (film thickness)
- Oven Temp.: Initial Temp. 50 °C, Hold 1.5 min,
- 1st rate 10 °C to 150 °C, 2nd rate 2 °C to 190 °C, 3rd rate 25 °C to 290 °C
- Injection volume: 2 μL (splitless mode)
- Gas flow: 1.0 mL/min.

MSD

- SIM mode (Selected ion)
- nitro-musks: MK (279, 294), polycyclic-musks: AHTN (243, 258), HHCb (243, 258, 213)

ternal STD인 musk xylene-*d*₁₅ 40 ng을 spiking한 후 dichloromethane (DCM) 100 mL를 주입하여 10분간 추출하고, 추출이 끝난 후 dichloromethane 용매층을 무수황산 나트륨 층을 통과시켜 용매층 내의 수분을 제거하였다. 이어서 DCM 추출이 끝난 시료수 200 mL에 *n*-hexane 100 mL를 주입하여 다시 10분간 추출한 후 무수황산 나트륨 층을 통과시켜 용매층 내의 수분을 제거하였다. 수분이 제거된 DCM과 *n*-hexane 용매를 250 mL 용량의 Zymark 농축관에 주입하여 질소농축기(Turbo Vap II, Zymark, USA)를 사용하여 농축한 후 recovery STD인 phenanthrene-*d*₁₀ 20 ng을 주입하여 최종 volume을 100 μL로 하였다. 인공 사향물질의 분석은 GC/MSD (6890 N, Agilent, USA/5973 N, Agilent, USA)로 분석하였으며, GC 컬럼은 HP-5MS (Agilent, USA)를 사용하였다. 인공 사향물질 분석에 사용된 GC/MSD의 분석조건을 Table 3에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 오존 투입농도 및 접촉시간별 인공사향물질 제거

오존 투입농도 및 오존 접촉시간별 원수와 사여과수 중의 인공사향물질 3종에 대한 제거특성을 Fig. 2에 나타내었다.

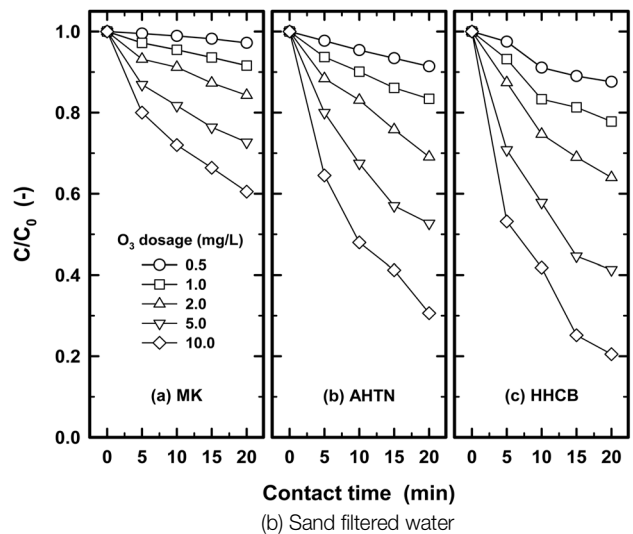


Fig. 2. Variations of relative residual concentration of three SMCs under various ozone dosage in raw water and rapid sand filtered water (Initial concentration: 1,000 ng/L)

Fig. 2에서 볼 수 있듯이 원수(Fig. 2(a))와 급속 사여과 처리수(Fig. 2(b)) 모두 오존 투입농도 및 오존 접촉시간이 증가할수록 제거율이 점진적으로 증가하는 경향을 나타내었으며, 원수에 비해 사여과수의 경우가 동일한 오존 투입농도에서 산화에 의한 제거율이 더 크게 나타났다. 또한, SMCs 3종중 HHCB가 오존에 의해 가장 빠른 분해능을 나타내었으며, 다음으로 AHTN과 MK로 나타났다.

원수에서 HHCB의 오존산화 특성을 나타낸 Fig. 2(a)를 보면, 오존 투입농도가 10.0 mg/L (0.5 mg/L·min)일 때 5분의 접촉시간에서 11%의 제거율을 보였고, 10분, 15분 및 20분에서의 제거율은 각각 35%, 50% 및 55%로 증가되었다. 또한, 오존 투입농도 0.5 mg/L (0.025 mg/L·min)에서는 7%(오존접촉 20분)의 제거율을 나타내었고 투입농도가 1.0 mg/L (0.05 mg/L·min), 2.0, 5.0 및 10.0 mg/L로 증가할수록 제거율(오존접촉 20분)은 각각 14, 26, 40% 및 55%로 증가하였다. AHTN의 경우에서도 10.0 mg/L의 오존 투입시 접촉시간 5~20분에서 제거율은 15~46%였으며, 오존 투입농도 0.5~10.0 mg/L에서 제거율(오존접촉 20분)은 6~46%로 나타났다. 또한, MK의 경우, 10.0 mg/L의 오존 투입농도에서 접촉시간이 5분에서 20분으로 길어질수록 제거율도 10~25%로 증가되었고, 오존 투입농도가 0.5 mg/L에서 10.0 mg/L로 증가할수록 제거율(오존접촉 20분)은 2~25%로 증가하였다.

급속 사여과 처리수 중의 인공사향물질의 제거특성을 나타낸 Fig. 2(b)를 보면 오존 접촉시간과 오존 투입농도 따른 제거경향은 원수(Fig. 2(a))에서와 유사하게 나타나고 있으나 제거율은 원수에서보다 급속 사여과 처리수에서 더 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. HHCB의 경우, 오존 투입농도 10.0 mg/L에서 5~20분의 오존접촉으로 제거율이 47~79%로 원수의 11~55%에 비해 제거율이 24~36% 정도 상승하였으며 또한, 투입농도가 0.5 mg/L~10.0 mg/L로 증가할수록 제거율은 12~79%로 상승하여 원수의 7~55% 보다 5~24% 정도 상승하였다. AHTN과 MK의 경우에도 제거율이 35~69%, 20~39%

로 원수의 15~46%, 10~25% 보다 제거율이 20~23%, 10~14% 정도 상승하였으며, 또한, 투입농도가 0.5 mg/L~10.0 mg/L로 증가할수록 제거율의 경우 9~69%, 3~39%로 상승하여 원수의 4~46%, 2~25% 보다 제거율이 3~23%, 1~14% 정도 상승하였다.

원수에 비해 급속 사여과 처리수에서의 SMCs 3종의 오존에 의한 제거율이 높게 나타나는 것은 원수에 비해 급속 사여과 처리수에 함유된 오존 소비물질들의 함량이 정수처리 공정(전오존 → 응집 → 침전)을 거치면서 감소하였기 때문이며, Table 2에서 볼 수 있듯이 수중에서 대표적인 오존 소비 물질인 DOC와 UV-254의 경우 원수가 급속 모래여과 처리수에 비해 2배 이상 높은 것을 알 수 있다. 또한, SMCs 3종 중에서 HHCB와 AHTN에 비해 MK의 오존 산화제거율이 낮은 이유로는 MK의 방향족 고리에 결합해 있는 nitro기에 의해 유발되는 입체장애(steric hindrance) 효과에 의한 결과로 Janzen 등¹⁹⁾은 보고하고 있다. 또한, Janzen 등¹⁹⁾은 오존 산화에 의해 AHTN 보다 HHCB이 쉽게 분해되는 것으로 보고하고 있어 본 연구와 유사한 결과를 나타내었다. 또한, Westerhoff 등의 연구⁹⁾에서는 MK와 HHCB의 오존 산화효율을 비교한 결과, MK의 경우 오존에 의해 평균 22%의 제거율을 나타낸 반면, HHCB의 경우는 평균 제거율이 80% 정도로 나타나 HHCB가 MK 보다 오존에 의한 제거율이 월등히 높은 것으로 보고하였다. Snyder 등의 연구¹¹⁾에서도 다양한 오존처리 조건에서 MK와 HHCB의 오존 제거효율을 조사한 결과, MK의 경우 18~36% 정도 제거된 반면 HHCB는 58~85% 정도의 제거율을 나타내어 HHCB의 제거율이 MK에 비해 월등히 높다고 보고하고 있어 본 연구결과와 유사하게 나타났다.

3.2. SMCs 3종의 산화 동력학 평가

오존 접촉시간에 따른 SMCs 3종의 $\ln C/C_0$ 가 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 유사 일차반응(pseudo-first order rate)로 나타나

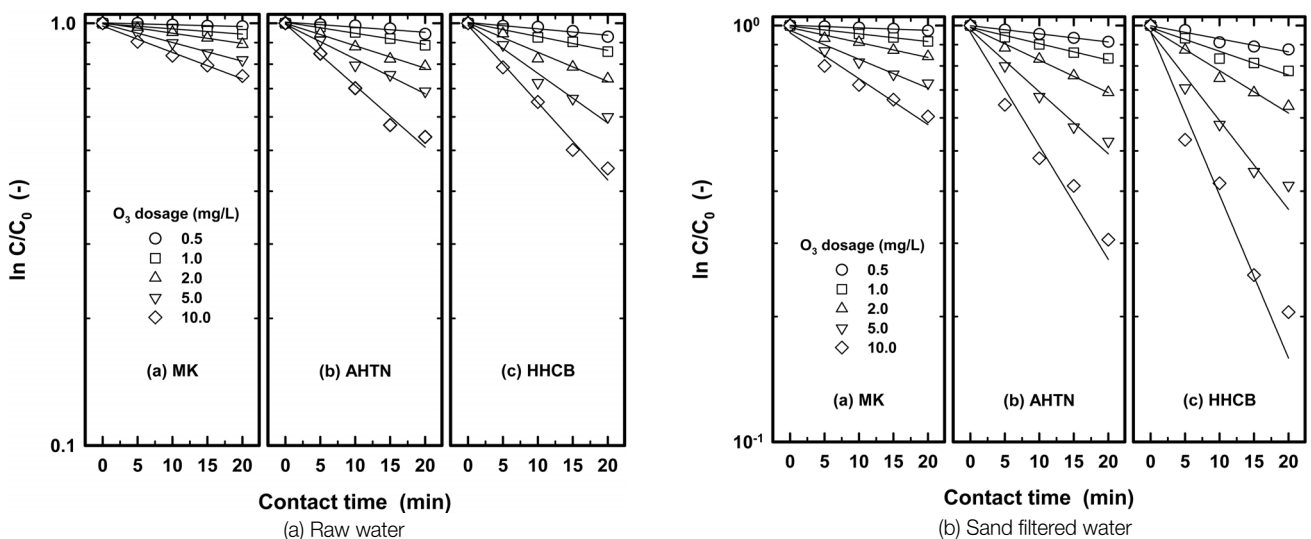


Fig. 3. Pseudo-first order reaction plot of three SMCs under various ozone dosage in raw water and sand filtered water (initial concentration: 1,000 ng/L).

Table 4. Pseudo-first-order reaction rate constants (k) and half-lives ($t_{1/2}$) for 3 SMCs degradation for various ozone dosage in raw water and rapid sand filtered water

O ₃ dosage (mg/L)	MK				AHTN				HHCB			
	raw		sand filtered		raw		sand filtered		raw		sand filtered	
	k (min ⁻¹)	$t_{1/2}$ (min)	k (min ⁻¹)	$t_{1/2}$ (min)	k (min ⁻¹)	$t_{1/2}$ (min)	k (min ⁻¹)	$t_{1/2}$ (min)	k (min ⁻¹)	$t_{1/2}$ (min)	k (min ⁻¹)	$t_{1/2}$ (min)
0.5	0.0010	693.0	0.0014	495.0	0.0028	247.5	0.0045	154.0	0.0035	198.0	0.0072	96.3
1.0	0.0029	239.0	0.0043	161.2	0.0060	115.5	0.0091	76.2	0.0076	91.2	0.0131	52.9
2.0	0.0056	123.8	0.0082	84.5	0.0122	56.8	0.0180	38.5	0.0160	43.3	0.0235	29.5
5.0	0.0102	67.4	0.0159	43.6	0.0189	36.7	0.0343	20.2	0.0270	25.7	0.0491	14.1
10.0	0.0144	48.1	0.0254	27.3	0.0336	20.6	0.0628	11.0	0.0422	16.4	0.0902	7.7

고 있어 원수와 급속 모래여과 처리수에서의 오존 투입농도 별 제거 속도상수(k)를 식 (1)로 구하였다.

$$C/C_0 = \exp(-k \cdot t) \quad (1)$$

여기서 절편값은 C (반응시간 후 농도)와 C_0 (초기농도)가 같을 때($C=C_0$)의 값이므로 1이며, k 는 제거 속도상수, t 는 반응시간(min)이다. 식 (1)을 이용하여 여러 실험조건에서 도출된 결과를 회귀분석하여 제거 속도상수 k 를 구하였다. 또한, 50% 제거시점인 반감기(half-life, $t_{1/2}$)를 식 (2)로 구하였으며, Table 4에 각각의 오존 산화조건에서의 제거 속도상수(k)와 반감기($t_{1/2}$)를 나타내었다.

$$t_{1/2} = 0.693/k \quad (2)$$

오존 투입농도별 SMCs 3종에 대한 제거 속도상수(k)와 반감기($t_{1/2}$)를 나타낸 Table 4를 보면, 원수에서 MK, AHTN 및 HHCB의 제거 속도상수(k)는 오존 투입농도가 0.5~10.0 mg/L로 증가할수록 MK가 0.0010~0.0144 min⁻¹, AHTN이 0.0028~0.0336 min⁻¹ 및 HHCB가 0.0035~0.0422 min⁻¹으로 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 사여과수에서도 오존 투입농도의 증가에 따라 제거 속도상수(k)가 증가하는 것으로 나타나 원수에서와 유사한 경향을 보인다.

각각의 오존 산화반응 조건에서 반감기($t_{1/2}$)를 나타낸 Table 4를 보면, MK, AHTN 및 HHCB 모두에서 오존의 투입농도가 증가할수록 반감기($t_{1/2}$)가 급격히 감소하였으며, 원수보다 사여과수에서 훨씬 짧은 반감기를 가지는 것으로 나타났다. MK의 경우, 오존 투입농도 10.0 mg/L에서 원수에서의 반감기는 48.1분인 반면 급속 사여과 처리수에서는 27.3분으로 나타나 오존 소모물질이 적게 함유된 급속 사여과 처리수가 원수에 비해 1.8배 정도 줄어드는 것으로 나타났으며 AHTN과 HHCB에서도 각각 1.9배, 2.1배 정도 감소하는 것으로 나타났다.

6. 결론

오존 산화공정을 이용하여 낙동강 원수 및 급속 사여과 처

리수에 함유된 인공 사향물질 MK, AHTN 및 HHCB 3종에 대한 산화분해 특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 오존 투입농도에 따른 SMCs 3종의 제거특성을 살펴본 결과, HHCB가 가장 높았고, 다음으로 AHTN과 MK

순으로 나타났으며, 0.5~10 mg/L의 오존 투입농도에서 MK의 경우 원수와 급속 사여과 처리수에서 각각 1.7~25.0% 및 2.8~39.5%의 제거율을 나타내었으며, AHTN은 5.7~46.2% 및 8.6~69.4%, HHCB의 경우는 7.1~54.7% 및 12.4~79.5%의 제거율을 나타내었다.

2) 오존 투입농도 0.5~10 mg/L에서 SMCs 3종에 대한 산화분해 속도상수(k)는 MK의 경우 원수와 급속 사여과 처리수에서 각각 0.0010~0.0144 min⁻¹와 0.0014~0.0254 min⁻¹으로 나타났으며, AHTN은 0.0028~0.0336 min⁻¹와 0.0045~0.0628 min⁻¹, HHCB의 경우는 0.0035~0.0422 min⁻¹ 및 0.0072~0.0902 min⁻¹으로 나타났다.

3) 오존 투입농도(0.5~10 mg/L)에 따른 SMCs 3종의 반감기($t_{1/2}$)는 MK의 경우 원수와 급속 사여과 처리수에서 각각 693.0~48.1 min 및 495.0~27.3 min으로 나타났으며, AHTN은 247.5~20.6 min 및 154.0~11.0 min, HHCB는 198.0~16.4 min 및 96.3~7.7 min으로 나타났다.

4) 전/후오존 공정이 갖추어진 낙동강 하류에 위치한 정수장들의 경우, 전오존 공정은 최대 1.5~2.0 mg/L의 오존 투입농도로 2~4분 및 후오존 공정은 최대 2.0~2.5 mg/L의 오존 투입농도로 6~8분 정도의 체류시간을 가지도록 설계되어 있어 비교적 고농도의 SMCs가 유입될 경우에는 오존처리만으로는 이들 물질들에 대한 제어가 어려운 것으로 나타났으며, 오존공정과 결합 가능한 고도산화 공정의 도입을 고려할 필요가 있는 것으로 나타났다.

KSEE

참고문헌

- Gatermann, R., Biselli, S., Hühnerfuss, H., Rimkus, G. G., Hecker, M. and Karbe, L., "Synthetic musks in the environment. Part 1: Species-dependent bioaccumulation of polycy-

- clic and nitro musk fragrances in freshwater fish and mussels,” *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* **42**, 437~446(2002).
2. Balk, F. and Ford, R. A., “Environmental risk assessment for the polycyclic musks, AHTN and HHCB. I. Effect assessment and risk characterization,” *Toxicol. Lett.*, **111**, 81~94(1999).
 3. Peck, A. M., “Analytical methods for the determination of persistent ingredients of personal care products in environmental matrices,” *Anal. Bioanal. Chem.*, **386**, 907~939(2006).
 4. Heberer, T., “Occurrence, fate and assessment of polycyclic musk residues in the aquatic environment of urban area-a review,” *Acta Hydrochim. Hydrobiol.*, **30**(5~6), 227~243(2002).
 5. Dsikowitzky, L., Schwarzbauer, J. and Littke, R., “Distribution of polycyclic musks in water and particulate matter of Lippe River (Germany),” *Organic Geochemistry*, **33**, 1747~758(2002).
 6. Simonich, S. L., Federle, T. W., Eckhoff, W. S., Rottiers, A., Webb, S., Sabaliunas, D. and Wolf, W., “Removal of fragrance materials during U.S. and European wastewater treatment,” *Environ. Sci. Technol.*, **36**(13), 2839~2847(2002).
 7. Simonich, S. L., Begley, W. M., Debaere, G. and Eckhoff, W. S., “Trace analysis of fragrance materials in wastewater and treated wastewater,” *Environ. Sci. Technol.*, **34**, 959~965(2000).
 8. 서창동, 손희중, 이인석, 오정은, “낙동강 수계에서의 인공사향물질 검출 특성,” *대한환경공학회지*, **32**(6), 615~624(2010).
 9. Westerhoff, P., Yoon, Y., Snyder, S. and Wert, E., “Fate of endocrine-disruptor, pharmaceutical, and personal care product chemicals during simulated drinking water treatment,” *Environ. Sci. Technol.*, **39**, 6649~6663(2005).
 10. Snyder, S. A., Wert, E. C., Lei, H. D., Westerhoff, P. and Yoon, Y., “What are the most effective treatment methods for removing EDCs and PPCPs?,” *J. AWWA.*, **36**(10), 24~27(2010).
 11. Snyder, S. A., Wert, E. C., Rexing, D. J., Zegers, R. E. and Drury, D. D., “Ozone oxidation of endocrine disruptors and pharmaceuticals in surface water and wastewater,” *Ozone. Sci. Eng.*, **28**, 445~460(2006).
 12. Ikehata, K., Gammal El-Din, M. and Snyder, S. A., “Ozonation and advanced oxidation treatment of emerging organic pollutants in water and wastewater,” *Ozone. Sci. Eng.*, **30**, 21~26(2008).
 13. Broséus, R., Vincent, S., Aboufadel, K., Daneshvar, A., Shuvé, S., Barbeau, B. and Prévost, M., “Ozone oxidation of pharmaceuticals, endocrine disruptors and pesticides during drinking water treatment,” *Water Res.*, **43**, 4707~4717(2009).
 14. Garcia-Ac, A., Broséus, R., Vincent, S., Barbeau, B., Prévost, M. and Shuvé, S., “Oxidation kinetics of cyclophosphamide and methotrexate by ozone in drinking water,” *Chemosphere*, **79**, 1056~1063(2010).
 15. von Gunten, U., “Ozonation of drinking water: Part I. Oxidation kinetics and product formation,” *Water Res.*, **37**, 1443~1467(2003).
 16. Tas, J. W., Balk, F., Ford, R. A., vandePlassche, E. J., “Environmental risk assessment musk ketone and musk xylene in the Netherlands in accordance with the EU-TGD,” *Chemosphere*, **35**, 2973~3002(1997).
 17. Paasivirta, J., Sinkkonen, S., Rantalainen, A. L., Broman, D. and Zebuhr, Y., “Temperature dependent properties of environmentally important synthetic musks,” *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, **9**(5), 345~355(2002).
 18. Lee, I. S., Lee, S. H. and Oh, J. E., “Occurrence and fate of synthetic musk compounds in water environment,” *Water Res.*, **44**, 214~222(2010).
 19. Janzen, N., Dopp, E., Hesse, J., Richards, J., Türk, J. and Bester, K., “Transformation products and reaction kinetics of fragrances in advanced wastewater treatment with ozone,” *Chemosphere*, **85**, 1481~1486(2011).