

효율적인 2-Methylisoborneol, Geosmin의 제거를 위한 Pulsed UV 공정과 Ultrasound 공정의 비교 연구

한종훈¹ · 허지용¹ · 김강욱¹ · 이준영¹ · 박원석² · 이종열² · 허남국^{1*}

¹육군3사관학교

²아름다운환경건설

A Study of Efficient Removal of 2-Methylisoborneol and Geosmin by Pulsed Ultraviolet and Ultrasound

Jonghun Han¹ · Jiyong Hur¹ · Kangwook Kim¹ · Junyoung Lee¹
Wonseok Park² · Jongyeol Lee² · Namguk Her^{1*}

¹Department of Civil and Environmental Engineering, Korea Army Academy at Young-Cheon

²Beautiful Environmental Construction Co., Ltd.

ABSTRACT

The degradation of off-flavors which is 2-Methylisoborneol (2-MIB) and geosmin by means of ultrasound (US) and pulsed ultraviolet (PUV) irradiation and its combination with catalyst (wire mesh, wire mesh coated TiO₂, and TiO₂) and additive (H₂O₂) were investigated via water system. A combination treatment of TiO₂ and H₂O₂ heterogeneity with US (24 kHz) and PUV (6000 W) has shown improved results in destroying 2-MIB and geosmin, which may be attributed to chain reactions by the enhanced formation of hydroxyl radicals (·OH) through H₂O₂ dissociation and reactive oxide ions of TiO₂ addition. Rapid degradation of off-flavors occurred within 2 min under PUV process with H₂O₂ 100 mg/L (81.5% for 2-MIB; 79.3% for geosmin) and TiO₂ 100 mg/L (83.7% for 2-MIB; 79.8% for geosmin), while compared with H₂O₂ 100 mg/L (58.4% for 2-MIB; 58.0% for geosmin) and TiO₂ 100 mg/L (59.2% for 2-MIB; 38.5% for geosmin) within 5 min under US process. Surprisingly, the emphasis was given on the comparison with the same injected energies between PUV and US on degradation efficiency. Based on the injected energy comparison, the US provided better degradation performance under equal input power of 200 kJ with H₂O₂ 100 mg/L, while compared with H₂O₂ 100 mg/L under PUV process. Our findings suggest that US can be more effective compared to PUV for the degradation of off-flavors in aspect of energy consumptions.

Key words : 2-Methylisoborneol, Geosmin, Catalyst, Pulsed ultraviolet, Ultrasound

1. 서 론

부영양화의 결과로 증식한 조류의 대사물질인 2-MIB과 geosmin은 냄새의 주요 원인물질로서 최소감지농도(odor threshold concentration, OTC)가 매우 낮아(Omur-Ozbek et al., 2007) 음용수의 질을 떨어뜨리는 주요한 요인이므로 환경부에서 이취미 유발물질 검사항목에 추가하는 등 관리의 필요성이 증대되고 있다(Ministry of Environment, 2010). 이러한 geosmin과 2-MIB 처리에 대해서는 기존에

활성탄이나 제올라이트 등을 이용하여 흡착시킨 후 오존을 이용하여 제거하는 공정이 사용되었는데 이와 같은 공정은 투자비용과 유지관리 비용이 높다는 단점이 있었다(Ellis, J. and Korth, W., 1993; Anselme et al., 1988; Chen et al., 2008). 위와 같은 한계를 가지는 기존의 이취미 유발물질 제거 공정의 대안으로써 UV를 이용한 고도산화공정(Advanced oxidation process, AOP)이 활발히 연구되고 있다.

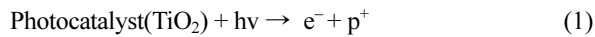
자외선을 이용한 공정은 광촉매를 사용하는 경우 제거

*Corresponding author : namguk@hanmail.net

Received : 2014. 12. 6 Reviewed : 2015. 3. 6 Accepted : 2015. 7. 27

Discussion until : 2015. 10. 31

효율이 증가하는 것이 알려져 있다. 자외선 공정의 효율 향상을 위해 일반적으로 적용되는 TiO_2 등의 광촉매를 사용하는 방법은 $\text{TiO}_2(3.0\text{-}3.2\text{ eV})$ 가 자외선을 흡수하여 전자-정공 쌍을 만들면 정공이 직접적으로 오염물질을 산화시키거나 물을 산화시켜 만든 OH 라디칼이 오염물질을 산화시켜 제거하고, 전도대에 존재하는 전자는 산소 분자를 환원시키는 과정을 이용한다(Eq. (1)~(5)). 이 두 과정은 동시에 일어나지 않기 때문에 전도대에 전자가 쌓이지 않아야 TiO_2 의 광촉매 역할이 원활해진다(Thiruvengatchari et al., 2008). 아울러 강한 산화력을 가지는 H_2O_2 는 소독이나 수처리에 널리 이용되는 화학종으로 UV를 조사하여 OH 라디칼 생성을 극대화시켜 오염물질을 산화시키는데 그 반응 메커니즘은 다음과 같다(Chitra et al., 2012).

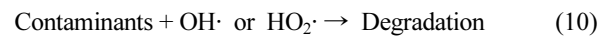
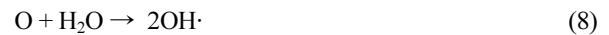


일반적으로 수처리에 적용하는 UV 종류는 저압램프(GreenEnTech, 2008), 중압램프(Linden et al., 2009), pulse 램프가 있는데 이 중 저압램프와 중압램프는 낮은 출력과 효율, 그리고 높은 유지관리 비용이라는 단점을 가지고 있다. 반면에 PUV 공정은 수십 수백 마이크로초 시간동안 자외선을 간헐적으로 조사하는 방식으로 연속파 자외선의 경우보다 강력한 자외선을 순간적으로 조사하여 C-C 결합 또는 C-O 결합의 분해에 의해 제거되는 기작을 이용하는 것으로(Bohrerova et al., 2008), 소독 부산물이 거의 생성되지 않으며, 오존(Anselme et al., 1988)에 비해 경제성이 뛰어나고, 기존 자외선 공정에 비해 부유고형물질 등에 의한 영향이 적으며, 반응시간이 매우 짧을 뿐 아니라 동일한 제거 기작의 기존 자외선 공정에 비해 긴 유효투과거리와 높은 에너지 효율 등의 장점이 있어 보다 효과적인 공정이라 판단된다(Bohrerova et al., 2008).

Sohn 등은 pulse UV 장치를 이용하여 geosmin과 2-MIB의 제거효과에 대한 연구를 진행하였다. 이들의 결과에 따르면 geosmin과 2-MIB의 경우 10초 조사시 C/C_0 값이 각각 0.3, 0.4를 가졌고 H_2O_2 를 첨가하는 경우 그 농도가 증가함에 따라 제거 속도가 증가하는 것으로 보고

하였다(Sohn et al., 2012).

자외선 뿐 아니라 초음파(US) 또한 고도산화공정으로 오염물질이 제거되는 것으로 알려져 있다(Adewuyi et al., 2001). 이 공정은 초음파를 조사했을 때 bubble-nucleation-growth-collapse 과정을 거치는 공동현상(cavitation)에 의해 음파 에너지가 화학적 에너지로 전환되어 이루어진다(Park et al., 2009). 공동현상 시 발생하는 기포의 내부는 고온($< 5,000\text{ K}$), 고압($< 1,000\text{ atm}$) 조건을 형성함으로써 열분해와 OH 라디칼에 의한 산화분해(Eq. (6)~(11)) 등 두 개의 기작으로 오염물질을 처리하게 되고 그 반응 메커니즘은 다음과 같다(Psillakis et al., 2004; Laughrey et al., 2001; Maillacheruvu and Safaai, 2002).



초음파 공정의 적용을 위한 다양한 조건에서의 연구는 frequency, pH, 촉매 부분에서 특히 많은 연구가 진행되고 있으며(Zhou et al., 2010), 현장 적용을 위한 연구가 지속되고 있다. Song 등은 US를 이용하여 geosmin과 2-MIB의 제거 특성을 살펴보는 연구를 수행하였다(song and O'Shea, 2007). 이들의 경우 640 kHz의 주파수에서 실험을 진행하였고 geosmin과 2-MIB의 first-order rate constants는 각각 0.12, 0.07 min^{-1} 을 가졌다.

위에서 언급한 연구들은 PUV나 US를 이용한 geosmin과 2-MIB의 제거특성에 대해서 연구했지만 semiconductor 촉매에 의한 제거율의 변화는 살펴보지 못했고 동일한 크기의 에너지를 조사하였을 경우 PUV와 US 중 어느 공정의 경우에 제거 효율이 높은지에 관한 통찰을 제공하지 못하고 있다.

따라서 본 연구에서는 PUV 및 US을 이용한 geosmin과 2-MIB의 제거 공정에 있어서 TiO_2 와 wire mesh(+ TiO_2) 등의 촉매를 적용하거나 H_2O_2 를 주입했을 경우에 대해 최대 제거율 및 제거 속도에 대한 영향을 분석하고, PUV와 US 공정에 대해 동일한 에너지를 이용한 경우의 제거율 비교를 통해 효율적인 제거방안을 모색했다.

2. 연구방법

2.1. 시스템 구성 및 운전조건

PUV 시스템은 유효용적 90 L의 stainless 재질의 반응조와 temperature controller, power supply(Green & Tech., Korea), PUV lamp로 구성하였다. 물질 제거 특성을 관찰하기 위해 PUV lamp로부터 10 cm 거리에 100 mL의 시료를 넣은 석영셀을 위치시킨 후 6,000 W의 출력으로 0, 1, 2, 3, 4, 5, 10분 동안 PUV를 조사한 후 결과를 분석하였다. US 시스템은 유효용적 3 L의 stainless 재질의 베스형 반응조, 초음파 장치(SEE-SONIC, UI-Tech., Korea; 580 kHz(200 W)) 및 temperature controller로 구성하였다.

2.2. 실험재료 및 분석방법

Table 1은 2-MIB와 geosmin의 일반적인 특성을 나타낸 것이다. 2-MIB와 geosmin은 sigma-aldrich 사의 순도 99% 이상 제품을 사용하였으며, 실험에 사용된 촉매인 TiO₂(powder), H₂O₂는 sigma-aldrich 사의 extra grade 제품을, wire mesh(coated TiO₂)는 순수한 Titanium wire mesh에 산소 가스가 흐르는 furnace에 넣어 600°C에서 4시간 동안 가열하여 제작하여 사용하였다.

정량분석은 Solid Phase Microextraction(SPME) 법을 이용하여 GC/MS(Agilent 6410)로 분석하였다. 2-MIB 및 geosmin 분석을 위한 조건은 다음과 같다. SPME fiber는 65 um PDMS/DVB를 사용하였고, sample 온도는 60°C, extraction time은 30 min, desorbtion time은 5

min이었다(Table 2).

3. 결과 및 고찰

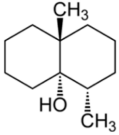
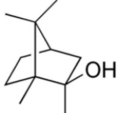
3.1. 촉매 및 보조제 주입에 따른 2-MIB와 geosmin 제거 특성

PUV 및 US 장치를 이용하여 최대 제거 효율을 얻고자 PUV 장치의 최대 출력인 6000 W 조건에서 선행연구 결과(Lee et al., 2014)를 바탕으로 TiO₂(1, 10, 100 mg/L)와 H₂O₂(1, 10, 100 mg/L)를 첨가하여 실험하였고 촉매 및 보조제 주입에 따른 2-MIB 제거율을 Fig. 1에 나타내었다. 시간에 따른 제거율을 비교해 본 결과 PUV 조사시 10분 안에 99% 제거되는 것을 확인하였으며, H₂O₂ 10, 100 mg/L, TiO₂ 100 mg/L 주입시 제거율이 향상하였고, 다른 경우에 대해서는 반응 시작 후 1분이 지났을 때 제거율이 향상하는 경향을 보였으나, 시간이 지남에 따라 PUV만 조사한 경우와 비슷한 제거율을 보였다.

한편 US의 경우 99% 제거에 소요되는 조사시간은 50분 이었으며, 5분이 지났을 경우 H₂O₂ 10, 100 mg/L, TiO₂ 100 mg/L 순으로 좋은 제거율을 보였으며, 시간이 지남에 따라 제거율의 변화는 3그룹으로 나누어 졌는데, US만 조사한 경우 가장 낮은 제거율을 보였고, H₂O₂ 1 mg/L, TiO₂ 1 mg/L 주입시 10% 미만의 제거율 상승을, H₂O₂ 10, 100 mg/L, TiO₂ 10, 100 mg/L 주입 및 wire mesh, wire mesh(TiO₂ coated)의 경우 20% 이상의 제거율 향상을 보였다(Fig. 1).

3.1에서의 실험을 geosmin에 대하여 진행한 결과를

Table 1. Typical taste and odor matter by algae(Suffett et al., 1996; Rashash et al., 1997)

Molecular structure	Symbol	Name	Molecular weight (g/mol)	Formula	Odor	OTC (ng/L)
	geosmin	trans-1,10-dimethyl trans-9-decalol	182	C ₁₂ H ₂₂ O	Earthy-musty	4
	2-MIB	2-methylisoborneol	168	C ₁₁ H ₂₀ O	Earthy-musty Camphorous	9

※ OTC: Odor threshold concentration

Table 2. GC/MS condition for analysis of 2-MIB and geosmin

Parameters	Injection Mode	Sample temp.	SPME Fiber	Extraction Time	Desorb Time
Conditions	SPME Mode	60°C	65 um PDMS/DVB	30 min, Immersing	5 min

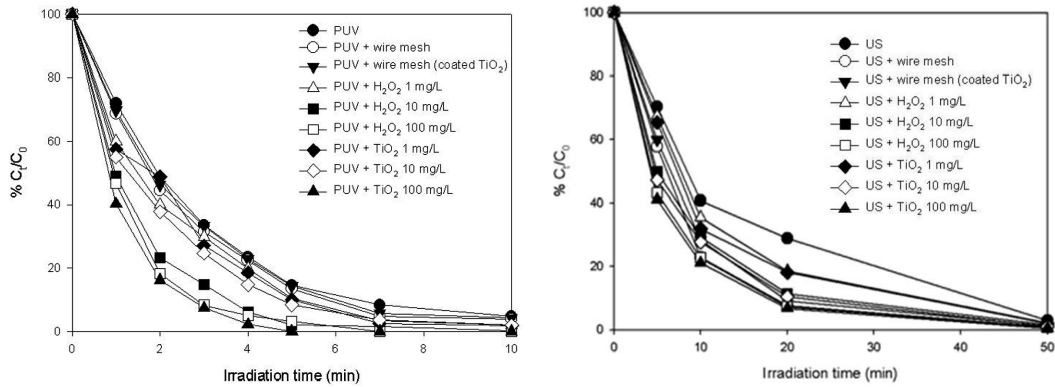


Fig. 1. Removal of 2-MIB by PUV and US with catalysts (wire mesh, wire mesh (coated TiO_2), H_2O_2 (1, 10, 100 mg/L), TiO_2 (1, 10, 100 mg/L)).

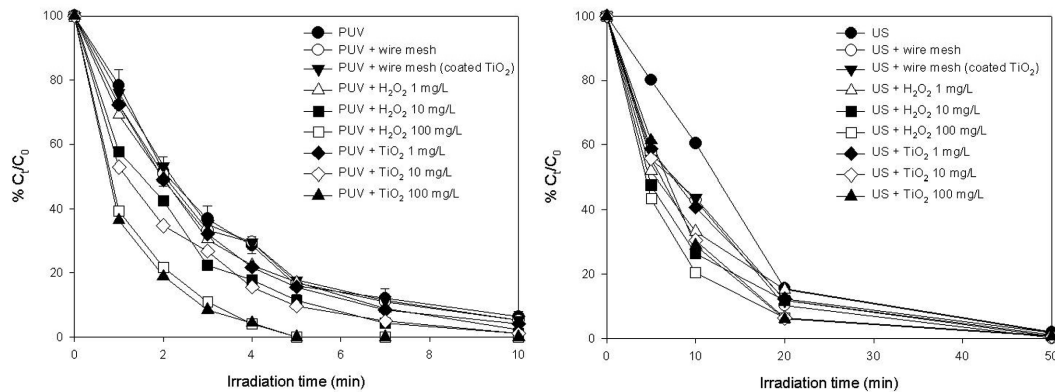


Fig. 2. Removal of geosmin by PUV and US with catalysts (wire mesh, wire mesh (coated TiO_2), H_2O_2 (1, 10, 100 mg/L), TiO_2 (1, 10, 100 mg/L)).

Fig. 2에 나타내었다. 시간에 따른 제거율 비교 결과 2-MIB와 유사하게 PUV 조사시 10 min 안에 99% 제거되는 것을 확인하였으며, H_2O_2 100 mg/L, TiO_2 100 mg/L 주입시 제거율이 가장 높게 향상하였고, H_2O_2 10 mg/L, TiO_2 10 mg/L 주입시에는 H_2O_2 1 mg/L, TiO_2 1 mg/L, PUV만 조사한 경우에 비해 초기(1 min) 제거율 기준으로 약 10%~15% 제거율이 향상하는 경향을 보였다. US의 경우 99% 제거에 소요되는 조사시간은 50 min이었으며, 초기(5 min)의 경우 H_2O_2 10, 100 mg/L, TiO_2 10, 100 mg/L을 주입한 경우가 H_2O_2 1 mg/L, TiO_2 1 mg/L, PUV만 조사한 경우에 비해 약 20%~25% 좋은 제거율을 보였다(Fig. 2).

제거율이 가장 높았던 TiO_2 100 mg/L을 주입한 경우와 H_2O_2 100 mg/L을 주입한 경우의 제거율을 비교해보면, PUV를 2분간 조사시 TiO_2 100 mg/L을 주입한 경우에 geosmin은 79.8%의 제거율을 보였으며, 2-MIB는 83.7%의 제거율을 나타내었고, H_2O_2 100 mg/L을 주입한 경우에는 geosmin은 79.3%, 2-MIB는 81.5%의 제거율을 나타내었다. 한편, US를 5분간 조사시 TiO_2 100 mg/L을

주입한 경우에 geosmin은 38.5%의 제거율을 보였으며, 2-MIB는 59.2%의 제거율을 나타내었고, H_2O_2 100 mg/L을 주입한 경우에는 geosmin은 58.0%, 2-MIB는 58.4%의 제거율을 나타내었다.

두 목표 물질에 대해서 US의 경우보다 PUV의 경우에 제거속도가 더욱 빠른 것으로 관찰됐다. 이는 TiO_2 와 H_2O_2 로부터 PUV와 US가 만들어낸 OH 라디칼이 목표 물질 분해에 관여할 뿐만 아니라 PUV에 의해 조사된 에너지가 직접적으로 C-C 결합 및 C-O 결합의 분해에 관여했기 때문인 것으로 판단된다.

3.2. 동일한 에너지 주입시 PUV와 US에 의한 제거율 비교

2-MIB와 geosmin의 제거에 대해 PUV와 US를 이용한 공정 중 더욱 효율적인 공정을 판단하기 위해서는 동일한 에너지를 주입하여 제거율을 비교해야한다. US와 PUV 장치에서 면적당 동일한 에너지를 주입했을 경우(200 kJ, 400 kJ)에 따른 2-MIB 및 geosmin의 제거율을 비교한 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

200 kJ 주입시는 PUV를 사용한 경우 H_2O_2 10, 100

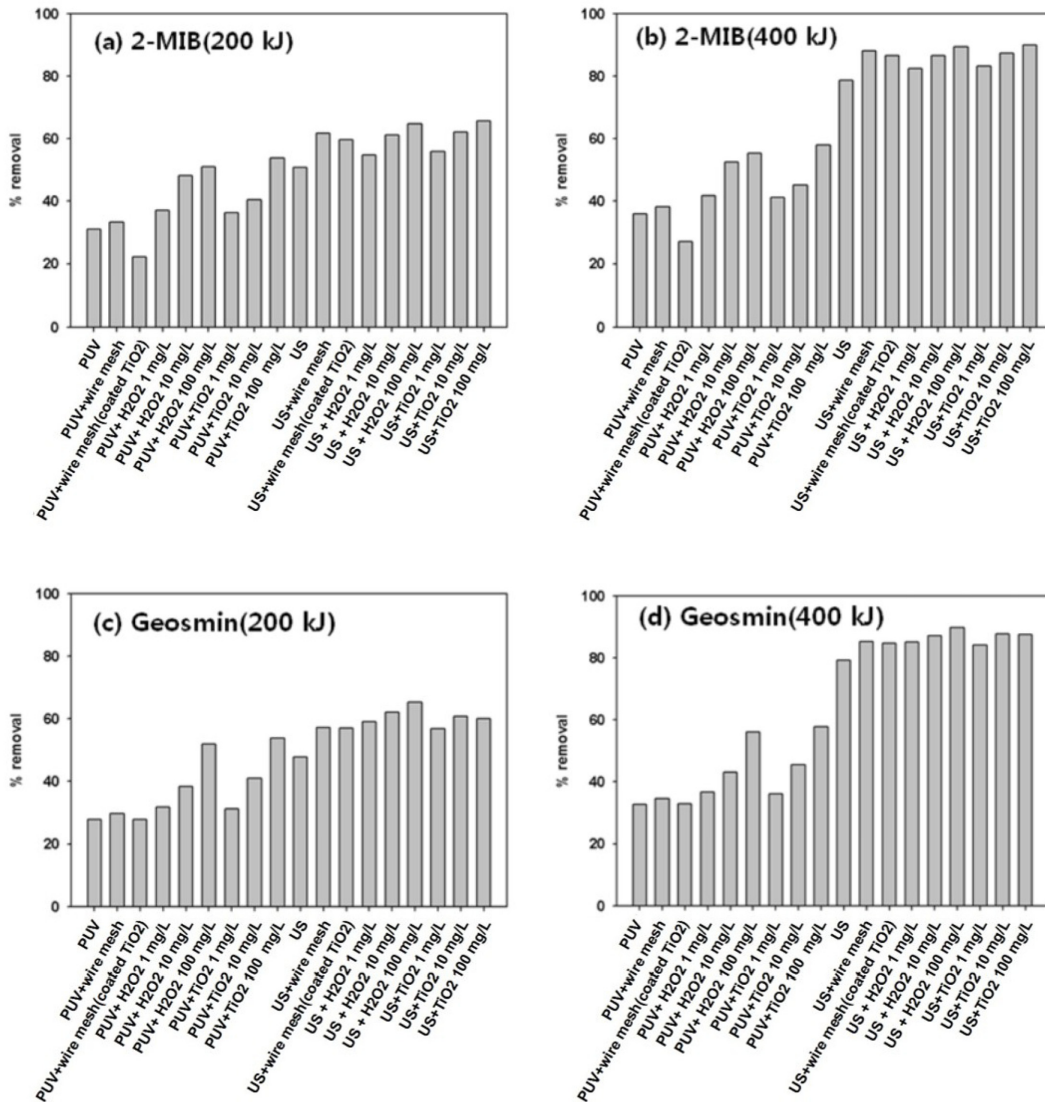


Fig. 3. Comparison of 2-MIB and geosmin removal efficiency by US and PUV process according to energy ((a) 2-MIB 200 kJ, (b) 2-MIB 400 kJ, (c) geosmin 200 kJ and (d) geosmin 400 kJ).

mg/L을 주입한 경우와 TiO₂ 100 mg/L을 주입한 경우 높은 제거율을 보였으며, US를 사용한 경우는 US를 단독으로 사용한 경우를 제외하고는 비교적 높은 제거율을 나타냈다. PUV와 US를 비교해 보면, US를 단독으로 사용한 경우에 비해 PUV를 이용한 공정이 에너지 주입대비 제거율이 높은 경우는 H₂O₂ 10, 100 mg/L을 주입한 경우와 TiO₂ 100 mg/L를 주입한 경우였다. 400 kJ 주입시는 US 공정을 적용하는 것이 에너지 주입 대비 제거율이 높은 것으로 나타났으며, 대부분 유사한 제거율을 나타냈다. 한편, 적은 에너지 주입 시 PUV와 US의 제거율 차이가 상대적으로 감소하므로, 2-MIB 및 geosmin 제거율을 낮은 수준으로 판단하였을 경우나 두 공정을 연계하

여 사용할 경우 초기에 PUV를 조사하여 150~200 kJ의 에너지 주입 후 US 공정을 연계 처리하는 방안이 에너지 및 시간 대비 처리효율을 확보할 수 있는 방안이라 판단된다.

3.3. Pseudo first-order rate constant($\ln(C_t/C_0) = -kt$, min^{-1})

PUV를 이용한 분해 반응의 속도상수는 유사 1차 속도 상수를 산출하여 비교한 선행연구(Lee et al., 2014)와 같이 분석 결과 1차 속도 상수는 H₂O₂ 100 mg/L 주입시 2-MIB의 경우 US 공정에서는 2.8×10^{-3} , PUV 공정에서는 1.3×10^{-2} 로 나타났으며, TiO₂ 100 mg/L 주입한 경우

Table 3. Pseudo first-order rate constant for the degradation of 2-MIB, and geosmin using US and PUV ($\ln(C_t/C_0) = -kt, \text{min}^{-1}$)

		No addition	Wire mesh	Wiremesh (TiO ₂)	H ₂ O ₂ 1 mg/L	H ₂ O ₂ 10 mg/L	H ₂ O ₂ 100 mg/L	TiO ₂ 1 mg/L	TiO ₂ 10 mg/L	TiO ₂ 100 mg/L
2-MIB	US	1.2E-03	1.8E-03	1.7E-03	1.3E-03	2.3E-03	2.8E-03	1.4E-03	2.5E-03	3.0E-03
	PUV	5.5E-03	6.2E-03	6.0E-03	8.5E-03	1.2E-02	1.3E-02	9.2E-03	1.0E-02	1.5E-02
geosmin	US	4.1E-05	5.6E-04	2.6E-03	1.1E-03	2.5E-03	3.7E-03	1.2E-03	1.4E-03	2.3E-03
	PUV	4.1E-03	5.4E-03	4.6E-03	6.2E-03	9.2E-03	1.6E-02	5.4E-03	1.1E-02	1.7E-02

Table 4. Comparison of pseudo first-order rate constant for the PUV degradation of 2-MIB, and geosmin using US and PUV

		No addition	Wire mesh	Wiremesh (TiO ₂)	H ₂ O ₂ 1 mg/L	H ₂ O ₂ 10 mg/L	H ₂ O ₂ 100 mg/L	TiO ₂ 1 mg/L	TiO ₂ 10 mg/L	TiO ₂ 100 mg/L
2-MIB	US	1.00	1.50	1.42	1.08	1.92	2.33	1.17	1.92	2.50
	PUV	1.00	1.13	1.09	1.55	2.18	2.36	1.67	1.82	2.73
geosmin	US	1.00	13.66	63.41	26.83	60.98	90.24	29.27	34.15	56.10
	PUV	1.00	1.32	1.12	1.51	2.24	3.90	1.32	2.68	4.15

에는 각각 3.0×10^{-3} , 1.5×10^{-2} 로 나타나 모든 실험 조건에서 H₂O₂ 100 mg/L 주입시와 TiO₂ 100 mg/L가 가장 높게 나타났다(Table 3). 또한 촉매나 보조제가 1차 속도 상수에 미치는 영향을 살펴보면 아무 것도 넣지 않은 경우에 비해서 속도 상수가 적게는 1.08배에서 최대 90.24 배 증가한 것을 볼 수 있었다(Table 4). 2-MIB의 분해 반응 속도 상수는 최대 2.5배 내외로 증가한 것을 볼 수 있고 이는 분해방법에 차이는 거의 없고 촉매나 보조제의 농도가 증가할수록 더 증가하는 것을 볼 수 있다. geosmin 분해 반응 속도 상수의 경우 PUV를 사용한 경우에 앞서 살펴본 2-MIB의 경우보다 약간 증가하여 약 4배의 증가를 볼 수 있었다. 하지만 US를 사용한 경우에 상수 값이 크게 증가하여 최소 13배에서 최대 90배로 증가함을 관찰했다. 선행연구결과(Lee et al., 2014)에 따르면 PUV는 라디칼을 생성하기보다 소모하므로 geosmin은 2-MIB보다 라디칼에 의한 분해 반응에 더욱 민감하게 작용하여 분해가 촉진되는 것이라고 추측한다.

한편, 2-MIB 제거를 위한 US 공정의 최적 촉매 조건은 TiO₂ 100 mg/L으로 나타난 반면, geosmin 제거를 위해서는 상대적으로 H₂O₂ 100 mg/L이 유리한 것으로 나타났다. 각 물질 공통으로 최적 제거 조건은 PUV + TiO₂ 100 mg/L인 것으로 판단되며(Table 4) 이는 선행연구의 결과와 유사한 경향을 가진다(Lee et al., 2014).

4. 결 론

geosmin과 2-MIB의 제거를 위해 PUV 및 US 공정에 다양한 촉매 및 H₂O₂를 적용한 결과 두 물질의 제거 경

향은 유사하게 나타났으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 각 공정에 H₂O₂ 및 TiO₂를 주입한 경우 주입한 농도에 따라 제거율 차이가 나타났으며, 두 실험 물질 모두에서 PUV 공정에 대해 H₂O₂ 100 mg/L, TiO₂ 100 mg/L 조건에서 제거율이 높았는데, 이는 PUV에 의해 직접적인 목표 물질의 결합 깨짐과 OH 라디칼 생성에 의한 산화반응에 의한 제거가 영향을 준 것으로 사료된다.

2) 유입 에너지와 제거율의 관계에 대해 분석한 결과 유입 에너지 대비 제거율은 US를 사용하는 것이 유리한 것으로 나타났으나, 시간과 제거율을 함께 고려하면 PUV를 이용한 제거 후 US를 이용한 제거를 하는 것이 보다 효과적인 것으로 나타났다.

3) 일차 속도상수 분석 결과 각 물질에 공통적인 최적 제거 조건은 PUV 공정에서 H₂O₂와 TiO₂ 촉매를 100 mg/L 사용한 경우인 것으로 나타났다. 그러나 본 연구에서 사용한 촉매는 사용 후 회수의 필요성이 있다는 점과 각 공정에 대해서 최대 효율을 나타내는 촉매는 상이하다는 점에 있어서 추후 촉매에 대한 연구가 계속되어야 할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 환경부 토양지하수오염방지기술개발사업(GAIA project)의 일환으로 수행되었으며(과제번호 2012000550022), 이에 감사드립니다.

References

- Adeuyi, Y.G., 2001, Sonochemistry: Environmental science and engineering applications, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **40**(22), 4681-4715.
- Anselme, C., Suffet, I.H., and Mallevalle, J., 1988, Effects of ozonation on tastes and odors, *J. Am. Water Works Assoc.*, **80**(10), 45-51.
- Bohrerova, Z., Shemer, H., Lantis, R., Impellitteri, C. A., and Linden, K. G., 2008, Comparative Disinfection efficiency of pulsed and continuous-wave UV irradiation technologies, *Water Res.*, **42**(12), 2975-2982.
- Chen, G., Dussert, B.W., and Suffet, I.H., 1997, Evaluation of granular activated carbons for removal of methylisoborneol to below odor threshold concentration in drinking water, *Water Res.*, **31**(5), 1155-1163.
- Chitra, S., Paramasivan, K., Cheralathan, M., and Sinha, P.K., 2012, Degradation of 1,4-dioxane using advanced oxidation processes, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **19**(3), 871-878.
- Ellis, J. and Korth, W., 1993, Removal of geosmin and methylisoborneol from drinking water by adsorption on ultrastable zeolite-Y, *Water Res.*, **27**(4), 535-539.
- GreenEnTech, 2008, The Pilot Study for the On-Site Demonstration of the High-Intensity Pulsed UV Disinfection System for Water Treatment, Ministry of Environment.
- Karl G Linden, Gwyam Shin, Jungkeun Lee, Karl Scheible, Chengyue Shen, Phtllis Posy, 2009, Demonstrating 4-log adenovirus inactivation in a medium-pressure UV disinfection reactor, *J. Am. Water Works Assoc.* **101**(3), 90-99.
- Laughrey, Z., Bear, E., Jones, R., and Tarr, M. A., 2001, Aqueous sonolytic decomposition of polycyclic aromatic hydrocarbons in the presence of additional dissolved species, *Ultrason. Sonochem.*, **8**(4), 353-357.
- Lee, H.U., Han, J.H., Yoon, Y.M., Lee, J.Y., Park, J.W., and Her, N.G., 2014, A study on the synergistic effects of hybrid system simultaneously irradiating the UV and US, *J. Korea Geo-Environ. Soc.*, **15**(7), 5-11.
- Maillacheruvu, K. and Safaai, S., 2002, Naphthalene removal from aqueous systems by sagittarius sp, *J. Environ. Sci. Health A Tox. Hazard. Subst., Environ. Eng.* **37**(5), 845-861.
- Ministry of Environment, 2010, Drinking Water Guideline.
- Omur-Ozbek P., Little J. C., and Dietrich A. M., 2007, Ability of humans to smell geosmin, 2-MIB and nonadienal in indoor air when using contaminated drinking water, *Water Sci. Technol.*, **55**(5), 249-256.
- Park, J.S., Park, S.Y., Oh, J.I., Jeong, S.J., Lee, M.J., and Her, N.G., 2009, Comparison of naphthalene degradation efficiency and OH radical production by the change of frequency and reaction conditions of ultrasound, *Korean Soc. Environ. Eng.*, **31**(2), 79-89.
- Psillakis, E., Goula, G., Kalogerakis, N., and Mantzavinos, D., 2004, Degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in aqueous solutions by ultrasonic irradiation, *J. Hazard. Mater.*, **8**, 845-861.
- Rashash, D.M.C., Dietrich, A.M., and Hoehn, R.C., 1997, FPA of selected odorous compounds, *J. Am. Water Works Assoc.*, **89**(4), 131-141.
- Sohn, J., Park, S., and Jung, E., 2012, Removal of taste and odor causing compounds in drinking water using Pulse UV System, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, **26**(2), 219-228.
- Song, W. and O'Shea, K.E., 2007, Ultrasonically induced degradation of 2-methylisoborneol and geosmin, *Water Res.*, **41**, 2672-2678.
- Suffett, I.H., Corado, A., Chou, D., Mcguire, M.J.M., and Butterworth, S., 1996, AWWA taste and odor survey, *J. Am. Water Works Assoc.*, **88**(4), 168-180.
- Thiruvengkatahari, R., Vigneswaran, S., and Moon, I.S., 2008, A review on UV/TiO₂ photocatalytic oxidation process, *Korean J. Chem. Eng.*, **25**(1), 64-72.
- Zhou, B., Yuan, R., Shi, C., Yu, L., Gu, J., and Zhang, C., 2010, Biodegradation of geosmin in drinking water by novel bacteria isolated from biologically active carbon, *J. Environ. Sci.*, **23**(5), 816-823.