

생물활성탄(BAC) 공정을 이용한 이취미물질(geosmin, 2-MIB)의 생분해 특성평가 Removal of Geosmin and 2-MIB using Biological Activated Carbon Process

손동민¹ · 손희종² · 이화자² · 강임석^{1*}

Dong-Min Son¹ · Hee-Jong Son² · Hwa-Ja Lee² · Lim-Seok Kang^{1*}

1 부경대학교 환경공학과, 2 부산광역시 상수도사업본부 수질연구소

(2008년 11월 15일 접수; 2009년 2월28일 수정; 2009년 3월15일 채택)

Abstract

Tastes and odor in water caused by geosmin and 2-MIB are the major customer complaints for water utilities. Therefore, control of geosmin and 2-MIB is a worldwide concern. In this study, the effects of biofilter media type (three different activated carbons and anthracite), empty bed contact time (EBCT) and temperature on the removal of geosmin and 2-MIB in BAC filters were investigated. Experiments were conducted at three different water temperatures (5, 15 and 25°C) and four different EBCTs (5, 10, 15, and 20 min). The experimental results indicated that the coal based BAC retained more bacterial biomass on the surface of the activated carbon than the other BACs, and increasing EBCT or increasing water temperature also increased the geosmin and 2-MIB removal in BAC filters. To achieve above 50% of removal efficiency for geosmin and 2-MIB in a BAC filter, above 10 min EBCT at 5°C and 5 min EBCT at above 15°C were required. The kinetic analysis for the biodegradation of geosmin and 2-MIB indicated a first-order reaction rate at various water temperatures. Data obtained from the BAC filters at various temperatures were also used to evaluate pseudo first-order rate constants for geosmin and 2-MIB. The half-lives evaluated at 5, 15, and 25°C for geosmin and 2-MIB ranged from 2.39 to 10.31 min and 3.35 to 13.97 min, respectively, which can be used to assist water utilities in designing and operating BAC system.

Key words : Geosmin, 2-MIB, Biological activated carbon, Biodegradation

주제어 : Geosmin, 2-MIB, 생물활성탄, 생분해

1. 서론

수돗물 중에 존재하는 이취미 물질은 인체에 직접적인 위해성을 나타내지는 않으나 수돗물의 안전성에 대한 불신을 초래하여 미국 등 선진국에서도 정수처리 공정에서 이취미물질의 제거에 많은 투자와 관심을 기울이고 있다

(Suffet et al., 1995; Bruce et al., 2002). 하천수나 호소수에는 다양한 이취미 물질들이 함유되어 있지만 민원 발생빈도와 수돗물 불신에 영향을 미치는 비중으로 보면 geosmin과 2-methylisoborneol (2-MIB)가 가장 대표적이라 할 수 있다. Geosmin과 2-MIB는 *Oscillatoria* sp., *Anabaena* sp. 및 *Phormidium* sp.와 같은 남조류나 방선균

* Corresponding author Tel:+82-51-629-6527, Fax:+82-51-629-6523, E-mail: Kangls@pknu.ac.kr(Kang, L.S.)

에 의해서 생성되는 것으로 알려져 있다(Herzing et al., 1977). 따라서 geosmin과 2-MIB 같은 이취미물질들은 상수원수중에 존재하는 조류의 종류와 개체수에 밀접한 연관성을 가진다. 또한, 국내의 정수장의 대부분의 공정들이 햇빛에 노출되는 개방형 시스템으로 구성되어 있어서 체류시간이 긴 침전지 내에서 조류가 재성장한다. 이들 조류는 염소에 대해 내성을 가진 조류로 녹조류인 *Mougeotia* sp.와 남조류인 *Oscillatoria* sp. 등이 침전지 벽면이나 침전지 유출 트러프에 군집을 형성하며, 실제로 이들에 의해 geosmin이 생성되었다는 연구보고도 있다(김 등, 2000). 상수원수에서 유입되거나 정수과정 자체에서 유래된 geosmin과 2-MIB 같은 이취미물질들은 수돗물에서 매우 낮은 농도로 검출된다(Suffet et al., 1995). 이들 물질의 역치농도(threshold concentration)는 개인별로 차이는 있으나 6~10 ng/L로 알려져 있어 수돗물에 매우 낮은 농도로 함유되어 있어도 이취미를 유발한다(Meng and Suffet, 1997).

Geosmin과 2-MIB 같은 이취미 물질들은 응집, 침전 및 여과와 같은 재래식 정수처리 공정에서는 제거능이 아주 낮은 것으로 보고되고 있다(Lalezary et al., 1986; Suffet et al., 1995). 따라서 geosmin이나 2-MIB를 제거하기 위해서는 오존을 이용한 산화공정(Ferguson et al., 1990; 이 등, 2006), 활성탄을 이용한 흡착공정(이 등, 2007) 및 생물여과 공정(Nerenberg et al., 2000; Westerhoff et al., 2005) 등이 주로 이용된다. Elhadi et al. (2004)과 Westerhoff et al. (2005)은 pilot 규모의 생물활성탄(biological activated carbon: BAC) 공정과 생물여과 공정을 이용하여 geosmin과 2-MIB 제거실험을 수행한 결과, 다양한 실험조건에서 geosmin과 2-MIB 제거가 효과적으로 이루어졌다고 보고하고 있다. Westerhoff et al. (2005)에 의하면 완속여과 biofilter에서는 geosmin과 2-MIB의 초기농도가 각각 360 ng/L와 25~69 ng/L에서 98%와 88~100%로 가장 높은 제거효율을 나타내었으나, 그 외 BAC, 모래 및 anthracite biofilter 등에서는 원수의 종류, 수온, DOC, 운전조건 등에 따라서 geosmin과 2-MIB의 제거효율이 17~80%로 매우 다양하게 나타났다고 하였다.

국내에서도 고도정수 공정으로 BAC 공정을 도입하여 여러 정수장에서 운영되고 있으며, 다양한 재질의 활성탄들이 BAC 공정에서 사용되고 있다. BAC 공정은 신탄을 충전하

여 6개월 정도 운전하면 과과(breakthrough)에 도달하여 용존 유기물질의 제거율이 10%~20% 정도 유지되며, BAC 공정에 의한 주 제거 메카니즘은 생물분해이므로 EBCT, 수온 및 생분해 가능한 유기물질(biodegradable organic matter: BOM) 농도에 많은 영향을 받는다. 그러나 이러한 다양한 조건에서 BAC 공정에서의 생물분해를 통한 이취미물질의 제거에 대한 연구는 거의 보고되고 있지 않다.

따라서 본 연구에서는 2년간 사용한 활성탄과 anthracite를 이용하여 활성탄 재질별 BAC 공정과 anthracite를 이용한 biofiltration 공정에서 geosmin과 2-MIB에 대한 생물분해능을 평가하였으며, BAC 공정의 효율에 많은 영향을 미치는 EBCT, 유입수의 수온 및 BOM 농도를 변화시켜 다양한 조건에서의 geosmin과 2-MIB에 대한 생물분해능을 평가하여 이취미 물질의 제거를 위한 BAC 공정의 설계 및 운영을 위한 기초 자료로 활용하고자 하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 실험재료

2.1.1 유입수 성상

유입수는 고도 정수처리용 pilot-plant의 후오존 처리수에 standard급 (Sigma-Aldrich) geosmin과 2-MIB를 투입하여 geosmin과 2-MIB의 농도가 각각 100 ng/L가 되도록 하였다. 후오존 처리수를 유입수로 사용한 이유는 실제 정수장의 BAC 여과지 운전조건과 동일하게 하기 위해서이며, 실험에 사용된 후오존 처리수의 특성을 Table 1에 나타내었다. 유입수의 수온은 수온조절 장치 (Buch, Recirculating chiller B-740, Swiss)를 이용하여 5°C~25°C로 조절하여 실험하였다.

2.1.2 BOM cocktail 및 무기영양염 조제

BOM cocktail은 Urfer (1998)의 방법을 이용하여 조제하였으며, BOM cocktail 물질은 Sigma사의 순도 99% 이상의 formaldehyde, glyoxal, formate 및 acetate를 사용하였다. BOM cocktail은 투입농도에 따라 low, middle 및 high BOM 시료수로 분류하여 실험하였다. Low BOM 시료수는 후오존 처리수에 BOM cocktail을 주입하지 않고 geosmin과 2-MIB만 투입한 시료수이며, middle BOM 시

Table 1. Characteristics of post O3 treated waters

Parameters	pH	Turbidity	DOC	BDOC
	(-)	(NTU)	(mg/L)	(mg/L)
Value	7.5~7.7	0.04~0.05	1.25~1.31	0.22~0.27

료수는 formaldehyde 100 µg/L, glyoxal 30 µg/L, formate 400 µg/L 및 acetate를 300 µg/L의 농도로 투입하여 후오존 처리수의 BDOC 농도를 280 µg/L로 증가시켰다. 또한 high BOM 시료수는 formaldehyde 200 µg/L, glyoxal 60 µg/L, formate 800 µg/L 및 acetate를 600 µg/L의 농도로 투입하여 후오존 처리수의 BDOC 농도를 560 µg/L로 증가시킨 시료수이다. 무기영양염의 주입은 박테리아 세포의 경험적인 분자식이 C₅₅H₇₇O₂₂N₁₁P₂로 보고되고 있어(Metcalf and Eddy, 1991) 박테리아가 세포 구성물질로 섭취하는 C:N:P의 비율이 21:5:1 (w/w/w)가 되게 하였다. 본 연구에서는 모든 실험조건에서 C:N:P 비율을 15:5:1 (w/w/w)로 조절하여 유기탄소 성분이 제한인자로 작용할 수 있도록 하였으며(Urfer, 1998), 무기영양염인 질소와 인의 보충을 위해 순도 99.5% 이상의 NaNO₃와 K₂HPO₄를 사용하였다.

2.1.3 생물활성탄 및 biofilter 여재

본 실험에 사용된 BAC들은 석탄계(coal) 재질(F400, Calgon), 야자계(coconut) 재질(1급, Samchully) 및 목탄계(wood) 재질(Pica, Picabiol)이며, biofilter 여재는 anthracite (한국 anthracite)를 사용하였다. 또한 BAC 및 anthracite는 낙동강 원수를 정수처리하는 1일 300톤 처리 규모의 pilot-plant에서 2년간 사용하였던 것이며, 운전한 bed volume은 108,000 정도이다. 실험에 들어가기 전에 실험에 사용된 geosmin과 2-MIB에 대한 순응기간을 15일간 두었으며, 7일 후부터 geosmin과 2-MIB에 대한 생물분해능을 조사한 후 생분해능이 더 이상 증가하지 않는 시점에서 실험을 진행하였다. 생물활성탄 칼럼의 geosmin과 2-MIB에 대한 순응실험은 유입수로 사용한 후오존 처리수에 geosmin과 2-MIB을 각각 100 ng/L로 투입하여 수온 20°C에서 BAC 칼럼의 EBCT를 20분으로 고정하여 15일간 운전하였다. 또한, 순응실험과 병행하여 pilot-plant에서 채집한 2년간 사용한 활성탄들에 대해 geosmin과 2-MIB에 대한 흡착능 유무를 조사하기 위해 박테리아의 신진대사 방해물질인 Sigma 사의 순도 99% 이상의 NaNO₃를 이용하

여 3일간 BAC 칼럼에 공급하면서 부착세균을 불활성화시킨 후 geosmin과 2-MIB에 대한 흡착능을 조사한 결과 흡착능이 거의 없는 것으로 나타났다(Elhadi et al., 2004).

2.2 실험방법

2.2.1 생물활성탄 공정 운전

생물활성탄 공정의 운전은 geosmin과 2-MIB 각각의 농도가 100 ng/L인 희석용액을 정량펌프를 사용하여 36 mL/min으로 분배조로 이송한 후 직경 20 mm인 16개의 투명 아크릴 활성탄 흡착조로 3 mL/min 씩 균등하게 분배되도록 하였다. 칼럼 내 활성탄은 각각 15, 30, 45, 60 mL 씩 충전하여 EBCT가 5, 10, 15, 20분이 되도록 조절하였고, 생물활성탄 칼럼은 하향류 방식으로 운전하였으며, Fig. 1에 생물활성탄 칼럼을 나타내었다. 생물활성탄 칼럼의 역세척은 주 1회 실시하였고, 역세척 방법은 생물활성탄 칼럼 하부로 처리수를 공급하여 활성탄 층이 50% 정도 팽창되도록 하였다. 유입수의 수온은 수온조절 장치를 이용하여 BAC 칼럼 상부에 온도계를 설치하여 칼럼으로 유입되는 유입수의 수온을 측정하였으며, 수온은 5°C, 15°C 및 25°C로 조절하여 실험하였으며, 수온을 조절 후 5일간 각각의 수온에 대한 순응기간을 가진 후 실험을 실시하였다.

2.2.2 Geosmin과 2-MIB의 분석

Geosmin과 2-MIB의 분석은 Polydimethylsiloxane

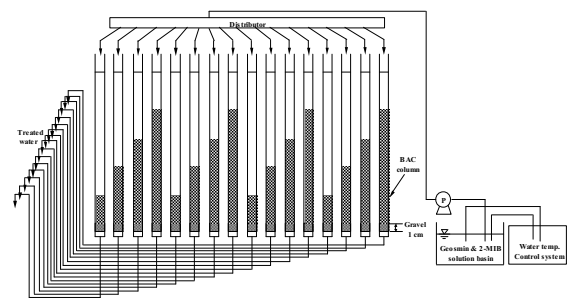


Fig. 1. Schematic diagram of continuous adsorption column.

Table 2. Analytical conditions of the GC/MSD

GC (6890N, Agilent, USA)
- Column: HP-5MS, 30 m (L)×0.25 mm (ID)×0.25 µm (film thickness)
- Oven Temp.: Initial Temp. 50°C, Hold 1.6 min,
- 1st rate: 20 to 100°C/min, 2nd rate: 10 to 140°C/min, 3rd rate: 5 to 160°C/min
MSD (5973N, Agilent, USA)
- SIM mode
- Selected ion: geosmin (111, 112, 125), 2-MIB (95, 108, 135)

(PDMS)이 코팅되어 있는 교반막대 (Twister™, Gerstel, Germany)에 geosmin과 2-MIB를 흡착시켜 분리하는 교반막대 흡착추출법(stir bar sorptive extraction: SBSE)을 전처리 방법으로 사용하였으며, 분석은 GC/MSD로 하였다(이, 2007). Geosmin과 2-MIB 전처리는 시료수 10 mL를 20 mL vial에 취한 후 길이 10 mm, 두께 3.2 mm인 교반막대를 투입하여 1200rpm으로 90분 동안 회전시켜 시료수에 함유된 geosmin과 2-MIB를 흡착, 추출하여 수분을 제거한 후 geosmin과 2-MIB가 흡착되어 있는 교반막대를 auto sampler가 부착되어 있는 TDS-2 system (Gerstel, Germany)을 이용하여 280℃까지 열을 가하여 5분 동안 geosmin과 2-MIB를 탈착시켰다. 탈착된 geosmin과 2-MIB는 GC 도입부(injector)에 설치되어 있는 CIS4 PTV(Gerstel, Germany)에서 액체질소에 의해 -120℃로 응축되어 있다가 일시에 GC/MSD로 주입되어 분석되었다. GC/MSD의 분석조건을 Table 2에 나타내었다.

2.2.3 생물활성탄 및 biofilter 부착세균의 생체량 및 활성도 측정

생물활성탄 및 anthracite biofilter에 부착된 종속영양 세균의 생체량(biomass)은 생물활성탄과 anthracite 습중량 1 g을 건조시킨 후 37 kHz, 190 W로 3분 동안 초음파 처리(DHA1000, Branson, USA)하여 세균을 탈리시킨 후 R₂A agar (Difco) 평판배지에 시료 1 mL를 단계적으로 희석 도달한 후 25℃ 배양기에서 2주간 배양하여 습중량 1 g당 colony 형성 세균수로 표시하였다(長澤, 1990; APHA et al., 1998). 세균의 활성도(activity)는 ³H-thymidine이 DNA에 흡수되는 정도로 구하였다(Fuhrman and Azam, 1982). 먼저 생물활성탄과 anthracite 습중량 1 g을 초음파 처리하여 세균을 탈리시킨 시료 2 mL에 200 nM [methyl-³H] thymidine 용액 1 mL와 200 nM cold thymidine 용액 1 mL를 첨가한 후 교반 배양기에서 in situ 조건으로 4시간 배양하였다. ATP 용액(25 g/L) 100 μL와 1 N NaOH 2 mL를 첨가하여 100℃에서 1시간 동안 가열하여 DNA를 추출한 후 잠시 냉각시키고 3000rpm에서 10분간 원심분리 하였다. 상정액 1 mL에 ice-cold 10% trichloroacetic acid 5 mL를 첨가하여 반응을 종료시키고 15분 정도 냉각시킨 후 0.2 μm 멤브레인 필터로 여과하였다. 이 여지를 vial에 넣고 건조시킨 후 ethyl acetate 1 mL와 10 mL의 scintillation cocktail (Aquasol-2, Packard Co.)을 주입하여 liquid scintillation analyzer(HP, 2500 TR/AB, USA.)로 방사선량을 측정하였다. 얻어진 DPM (disintegrates per minute) 값으로부터 Parsons et al. (1984)에 의한 식을 이용하여 세균에 결합된 thymidine의

양을 계산하였다(Bell et al., 1983).

3. 실험결과 및 고찰

3.1 EBCT 변화에 따른 geosmin과 2-MIB 생분해 특성

수은 15℃의 유입수에 geosmin과 2-MIB를 각각 100 ng/L의 농도로 투입하여 활성탄 재질별 및 anthracite biofilter에서의 EBCT 5분~20분에 대한 geosmin과 2-MIB의 제거율을 Fig. 2에 나타내었다. 활성탄 재질별 및 anthracite biofilter에서 EBCT 변화에 따른 geosmin과 2-MIB에 대한 제거 경향은 거의 유사하게 나타나고 있다. 우선 geosmin의 경우, 석탄계 재질의 BAC에서의 EBCT 5분~20분에 대한 제거율은 57.2%~99.7%로 나타났으며, 야자계, 목탄계 및 anthracite biofilter의 경우는 각각 54.0%~99.0%, 51.6~99.0% 및 38.0%~91.0%로 각각 나타나 석탄계 재질의 BAC가 활성탄 재질별 제거율에서 가장 우수하게 나타났고, anthracite biofilter의 경우는 활성탄 BAC 보다는 낮은 제거율을 나타내었다. 또한 2-MIB의 경우는 석탄계, 야자계, 목탄계 재질의 BAC 및 anthracite biofilter에서의 EBCT 5분~20분에 대한 제거율의 변화는 각각 46.3%~96.0%, 37.2%~92.6%, 36.0%~91.2% 및 21.8%~82.4%로 나타나 전반적으로 geosmin 보다 낮은 제거율을 나타내었다. Geosmin과 2-MIB에 대한 BAC 재질별 및 anthracite biofilter에서의 생물분해능은 석탄계 > 야자계 > 목탄계 > anthracite 순으로 나타났다. 이러한 결과는 BAC 재질별 및 anthracite biofilter에서의 부착세균의 생체량과 활성도의 차이에서 기인한 것으로 손 등(2005)은 야자계나 목탄계 활성탄에 비해 석탄계 활성탄에서 부착세균의 생체량과 활성도가 높은 이유를 석탄계 활성탄이 가지는 높은 유기물 흡착능과 세균들이 부착·서식하기에 좋은 500 Å 이상의 거대세공(macropore)이 많은 것에 기인한다고 보고하고 있으며, 유기물 흡착능이 우수한 활성탄은 유기물 흡착능이 낮은 활성탄 보다 상대적으로 부착세균이 기질로 이용하는 유기탄소원의 공급이 뛰어나다는 것을 의미한다. 또한, 다공성 재질의 활성탄을 이용하는 BAC 공정과 다공성 재질이 아닌 anthracite를 이용하는 biofilter에서의 생물분해 메커니즘의 차이는 anthracite biofilter의 경우, 여재 표면에 미생물이 부착되어 수류의 흐름에 따라 전달되는 유기 탄소원을 직접 제거하는 메커니즘을 가지는 반면, 활성탄과 같은 다공성 여재의 경우 표면뿐만 아니라 공극 내에 부착 미생물들이 많이 서식하기 때문에 직접적인 생분해 메커니즘도 가지며, 또한 세공이 가지는 흡착력에 의해 흡착된 유기 탄소원을 서서히 분해시키는 간접적인 생분해 메커니즘도 가진다. 따

라서 활성탄과 anthracite에서의 제거율 차이는 이러한 메카니즘 차이에 의해 기인된 것으로 판단된다.

3.2 수온변화에 따른 geosmin과 2-MIB 생분해 특성

Fig. 2의 실험결과에서 geosmin과 2-MIB에 대해 가장 우수한 생분해능을 나타낸 석탄계 재질의 BAC와 직접적인 생분해 메카니즘을 이용하는 anthracite biofilter를 이용하여 수온변화에 따른 각각의 EBCT에서의 geosmin과 2-MIB에 대한 생분해능을 **Fig. 3**에 나타내었다. Geosmin과 2-MIB 모두 석탄계 BAC 및 anthracite biofilter에서 유입수의 수온 상승에 따라 각각의 EBCT에서의 생분해율이 급격히 증가하는 것으로 나타났으며, geosmin의 경우는 수온이 5°C일 때 석탄계 BAC에서 EBCT가 5분, 10분, 15분 및 20분일 때의 생분해율이 각각 22.7%, 47.7%, 69.1% 및 84.5%로 나타났으며, anthracite biofilter의 경우는 EBCT가 5분, 10분, 15분 및 20분일 때의 생분해율이 각각 9.1%, 30.4%, 46.5% 및 69.3%로 나타나 BAC 공정 보다 낮은 제거율을 보였다. 또한, 수온이 15°C 및 25°C로 증가시킨 경우 석탄계 BAC와 anthracite biofilter에서의 EBCT 5분~20분일 때 geosmin 생분해율은 15°C의 경우 각각 57.2%~99.7% 및 38.0%~91%로 나타났으며, 25°C의 경우는 각각 78.0%~100% 및 59.1%~97.0%로 나타났다. 또한, 2-MIB의 경

우는 수온이 5°C일 때 석탄계 BAC와 anthracite biofilter에서 EBCT가 5분, 10분, 15분 및 20분일 때의 생분해율은 각각 9.0%와 1.1%, 35.2%와 18.2%, 56.3%와 30.7% 및 71.7%와 53.0%로 나타났다. 또한, 수온이 15°C 및 25°C로 증가시킨 경우 석탄계 BAC와 anthracite biofilter에서의 EBCT 5분~20분일 때 geosmin 생분해율은 각각 15°C의 경우 46.3%~96.0% 및 21.8%~82.4%로 나타났으며, 25°C의 경우는 각각 69.7%~99.0% 및 50.0%~90.4%로 나타났다.

전체적으로 geosmin이나 2-MIB의 경우, 수온이 낮고 EBCT가 짧은 조건에서는 석탄계 BAC와 anthracite biofilter와의 생분해율의 차이가 많고, 수온이 높아지고 EBCT가 길어질수록 석탄계 BAC와 anthracite biofilter와의 생분해율의 차이는 줄어드는 경향을 나타내었다. 활성탄과 anthracite biofilter에서의 할로아세트니트릴류 및 클로라하이드레이트 제거특성을 조사한 배 등(2008)은 anthracite biofilter의 경우 수온 저하시에 생물활성탄 보다 부착세균에 의한 생분해율의 저하가 급격히 나타나며, 이는 anthracite biofilter의 경우는 부착세균이 anthracite 표면에만 부착하고 있기 때문이며, 생물활성탄의 경우는 활성탄 표면뿐만 아니라 거대세균 및 중간세균에도 많은 세균군집이 서식하고 있으며, 세균 내에 서식하는 세균군집의 경우 표면에 서식하는 세균군집 보다 유입수의 수온 저하에 훨씬 강한 내성을 보인다고 보고하고 있다. 또한 anthracite

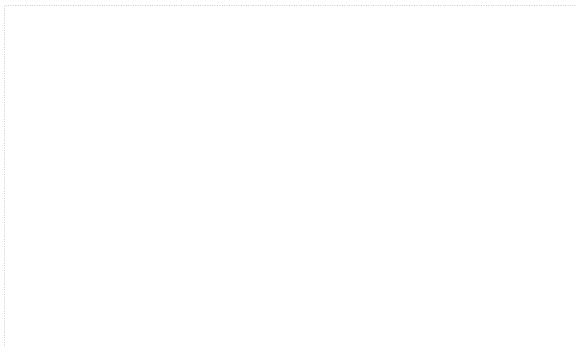


Fig. 2. Geosmin and 2-MIB removals according to various EBCTs and BAC materials at 15°C.

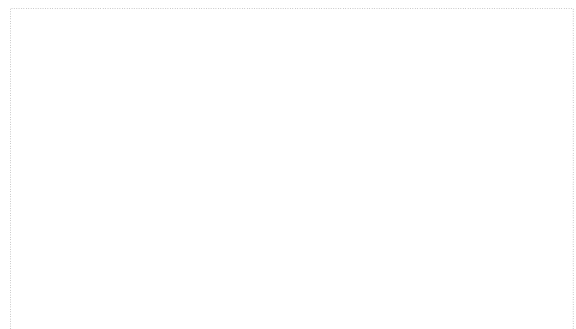


Fig. 3. Geosmin and 2-MIB removals according to various water temperatures and EBCTs in the coal based BAC and anthracite biofilter.

Table 3. Biomass and activity of attached bacteria in the various BAC and anthracite biofilter

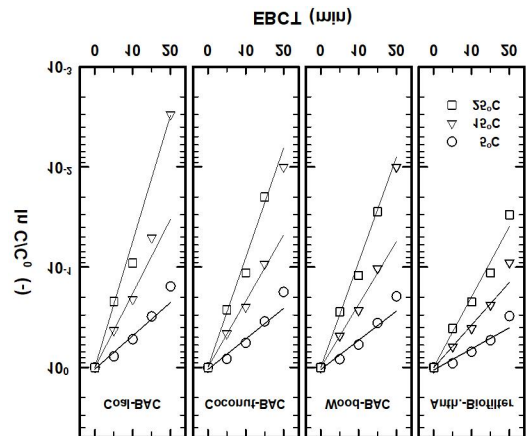
Water temp.	Coal-BAC		Coconut-BAC		Wood-BAC		Anth.-Biofilter	
	Biomass (CFU/g)	Activity (mgC/m ³ · hr)	Biomass (CFU/g)	Activity (mgC/m ³ · hr)	Biomass (CFU/g)	Activity (mgC/m ³ · hr)	Biomass (CFU/g)	Activity (mgC/m ³ · hr)
5°C	1.9×10 ⁷	1.89	1.6×10 ⁷	1.51	1.6×10 ⁷	1.44	3.9×10 ⁶	1.01
25°C	2.6×10 ⁷	2.91	2.3×10 ⁷	2.49	2.1×10 ⁷	2.35	7.5×10 ⁶	1.98

biofilter에서 수온 저하에 따른 효율저하는 부착세균의 활성도(activity) 저하가 주 원인으로 보고하였다.

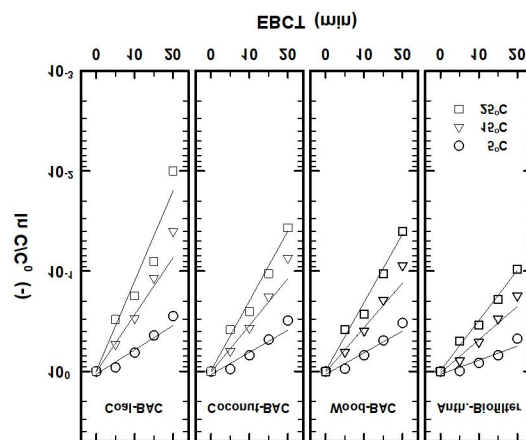
수온 5°C와 25°C에서의 BAC 재질별 및 anthracite biofilter의 부착세균의 생체량과 활성도를 조사한 결과를 Table 3에 나타내었다. 석탄계 BAC의 경우 수온이 25°C에서 5°C로 저하되었을 경우 생체량은 2.6×10^7 CFU/g에서 1.9×10^7 CFU/g으로 17% 감소한 반면, 활성도는 $2.91 \text{ mgC/m}^3 \cdot \text{hr}$ 에서 $1.89 \text{ mgC/m}^3 \cdot \text{hr}$ 로 35% 정도가 감소하였다. 또한 야자계와 목탄계의 경우도 수온저하에 따라서 생체량은 20~23% 정도 감소한 반면 활성도의 경우는 39% 정도 감소하는 것으로 나타나, 수온 저하에 따른 BAC의 효율저하는 부착세균의 생체량 감소에 의한 원인 보다는 활성도 저하가 더 높은 비중을 차지하는 것으로 나타났다. Anthracite biofilter에서는 수온이 25°C에서 5°C로 저하되었을 경우 부착세균 생체량은 7.5×10^6 CFU/g에서 3.9×10^6 CFU/g으로 48% 감소하였으며, 활성도의 경우도 49% 정도 감소하는 것으로 나타나 BAC 공정보다 수온의 저하에 따른 부착세균의 생체량 및 활성도의 감소폭이 큰 것으로 나타났다. 또한, BAC 공정에 비해 부착세균 생체량이 BAC 공정의 20~29%, 활성도의 경우도 53~84% 정도로 나타나 BAC 공정 보다 생분해 효율이 낮은 상태인 것으로 나타났다. Westerhoff et al. (2005)의 연구에서도 오존처리수를 이용하여 geosmin과 2-MIB에 대한 실험결과 BAC가 anthracite/모래 2단 biofilter 보다도 제거효율이 훨씬 높았으며, 이는 BAC에 부착된 생체량이 높게 나타났기 때문이라고 하였다. Moll et al. (1999)은 부착미생물의 생체량으로 미생물의 신진대사능을 평가하는 것은 부적절하며, 생체량과 유기물의 산화능력과는 밀접한 상관성은 없는 것으로 보고하고 있다. 또한, Melin et al. (2002)은 수온의 변화에 따른 세균의 생체량, 활성도 및 유기물 산화능력의 상관성을 조사한 결과 수온의 변화에 따라 생체량은 큰 변화는 나타나진 않았으나 세균의 활성도는 급격히 저하되어 유기물 산화능력도 저하했다고 보고하였다.

3.3 BOM 농도에 따른 geosmin과 2-MIB 생분해 특성

석탄계 재질의 BAC를 이용하여 유입수의 수온 및 BOM 농도변화에 따른 geosmin과 2-MIB에 대한 생분해능을 Fig. 4에 나타내었다. Geosmin의 생분해 제거율은 EBCT가 5분일 경우 low, middle 및 high BOM 농도에서 수온이 5°C와 25°C에서 각각 22.7%와 78.0%, 21.8%와 79.0% 및 6.2%와 71%로 나타났으며, EBCT 10분일 경우는 47.7%와 90.9%, 46.7%와 92.0% 및 36.8%와 86.1%로 나타났으며, EBCT 20분 일 경우는 84.5%와 100%, 83.7%와 100% 및 77.8%와 98.8%로 나타나 수온이 5°C와 25°C일 때 모두 BOM 농도가 가장 높을 때 geosmin의 생분해능이 낮아지는 것으로 나타났다. 그러나 low BOM과 middle BOM의 경우에는 geosmin의 제거율에 큰 차이를 보이지 않았다. 이러한 경향은 제거율에는 차이가 있으나



(a) geosmin



(b) 2-MIB

Fig. 4. Geosmin and 2-MIB removals according to various BOM concentrations and EBCTs in the coal-based BAC filter.

Fig. 5. Pseudo first-order reaction plot of geosmin and 2-MIB for various water temperatures in the various BAC filters and anthracite biofilter.

Table 4. Pseudo first-order reaction rate constants and half-lives for geosmin and 2-MIB biodegradation at various water temperatures and BOM concentrations

(a) Under various water temperatures (low BOM concentration)

Conditions	Compounds	Rate constant (k) (min ⁻¹)	Half-life (t _{1/2}) (min)	Reaction order (n) (-)
Coal-BAC (5°C)	geosmin	0.0766	9.05	1.04
	2-MIB	0.0559	12.40	1.06
Coal-BAC (15°C)	geosmin	0.1704	4.07	1.00
	2-MIB	0.1311	5.29	1.00
Coal-BAC (25°C)	geosmin	0.2897	2.39	1.00
	2-MIB	0.2071	3.35	0.99
Coconut-BAC (5°C)	geosmin	0.0702	9.87	1.05
	2-MIB	0.0511	13.56	1.07
Coconut-BAC (15°C)	geosmin	0.1521	4.56	1.00
	2-MIB	0.1074	6.45	1.02
Coconut-BAC (25°C)	geosmin	0.2515	2.76	1.00
	2-MIB	0.1606	4.32	0.99
Wood-BAC (5°C)	geosmin	0.0672	10.31	1.05
	2-MIB	0.0496	13.97	1.07
Wood-BAC (15°C)	geosmin	0.1445	4.80	1.00
	2-MIB	0.1024	6.77	1.02
Wood-BAC (25°C)	geosmin	0.2413	2.87	1.00
	2-MIB	0.1571	4.41	0.98
Anth.-Biofilter (5°C)	geosmin	0.0485	14.29	1.06
	2-MIB	0.0324	21.39	1.07
Anth.-Biofilter (15°C)	geosmin	0.0980	7.07	1.00
	2-MIB	0.0765	9.06	1.04
Anth.-Biofilter (25°C)	geosmin	0.1623	4.27	0.99
	2-MIB	0.1152	6.02	0.98

(b) Under various BOM concentration (for coal based BAC filter at 5°C and 25°C)

Conditions	Compounds	Rate constant (k) (min ⁻¹)	Half-life (t _{1/2}) (min)	Reaction order (n) (-)
Low BOM (5°C)	geosmin	0.0766	9.05	1.04
	2-MIB	0.0559	12.40	1.06
Middle BOM (5°C)	geosmin	0.0742	9.34	1.04
	2-MIB	0.0547	12.67	1.06
High BOM (5°C)	geosmin	0.0622	11.14	1.08
	2-MIB	0.0388	17.86	1.07
Low BOM (25°C)	geosmin	0.2897	2.39	1.00
	2-MIB	0.2071	3.35	0.99
Middle BOM (25°C)	geosmin	0.2972	2.33	1.00
	2-MIB	0.1981	3.50	0.99
High BOM (25°C)	geosmin	0.2250	3.08	0.99
	2-MIB	0.1506	4.60	0.99

2-MIB의 경우에도 유사하게 나타나고 있어 유입수중의 BOM 농도가 높을 경우 geosmin이나 2-MIB의 생분해에 영향을 미치는 것으로 조사되었다. 이것은 BAC에 부착된 부착세균들이 생분해가 쉬우며 후오존 처리시 주로 생성되는 BDOC 구성물질이며 BOM cocktail 성분물질인 formaldehyde, glyoxal, formate 및 acetate를 유기탄소 기질로 먼저 이용하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 다소 빈영양상태에서 부착세균들은 geosmin과 2-MIB를 2차 기질로서 활발하게 이용한다고 판단된다. Rittman et al. (1995)은 biofilter를 이용한 정수처리시 BDOC와 AOC (Assimilable organic carbon)는 주로 1차 기질로 이용되며, 1차 기질물질이 미생물 성장을 위한 최소농도에 이르면 2차 기질물질들이 생분해 된다고 하였다.

3.4 Geosmin과 2-MIB의 생분해 동력학 평가

손 등 (2001)의 연구에 의하면 Fig. 5와 같이 biofilm에서 반응시간에 따른 반응물질의 변화, 즉 $\ln(C/C_0)$ vs. time이 직선식으로 나타날 경우 pseudo first-order rate로 표현 가능하다고 보고하였다. 따라서 Fig. 5에 나타난 활성탄 재질별 BAC 및 anthracite biofilter에서 각각의 EBCT에서 유입수 수온변화에 따른 geosmin과 2-MIB의 생분해율을 이용하여 각각의 조건에서의 생분해 속도상수 (reaction rate constant, k)를 식 (1)로 구하였다.

$$C/C_0 = \exp(-kt) \quad (1)$$

여기서 절편값은 C (반응시간 후 농도)와 C_0 (초기농도)가 같을 때의 값이므로 $\ln(C/C_0)=1$ 이며, k 는 생분해 속도상수, t 는 반응시간(EBCT)이다. 식 (1)을 이용하여 여러 실험조건에서 도출된 결과를 회귀분석하여 k 를 구하였다. 또한, geosmin과 2-MIB의 50% 제거시점인 반감기 (half-life, $t_{1/2}$), 즉 $\ln(1/2) = -0.693$ 는 식 (2)를 이용하여 구하였다.

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

Table 4(a)와 (b)에 활성탄 재질별 BAC 및 anthracite biofilter의 운전 조건별 k 와 $t_{1/2}$ 를 나타내었다. Table 4(a)에 나타낸 low BOM 조건에서 수온이 5°C~25°C일 때 geosmin에 대한 석탄계 BAC에서의 k 는 0.0766~0.2897 min^{-1} 으로 나타나 수온이 5°C에서 25°C로 증가하면 k 는 3.8배 정도 증가하여, $t_{1/2}$ 는 9.05 min에서 2.39 min으로 감소하였다. 야자계와 목탄계 BAC 및 anthracite biofilter의 경우도 유입수의 수온 상승에 따라 k 가 증가하며 $t_{1/2}$ 가

줄어드는 것으로 나타났다. 또한, BAC 재질별 비교에서는 석탄계 BAC가 야자계와 목탄계 BAC 보다 1.1~1.2배 정도 큰 k 를 나타내었으며, anthracite biofilter의 경우는 k 와 $t_{1/2}$ 이 수온 5°C~25°C에 따라서 각각 0.0485~0.1623 min^{-1} 과 14.29~4.27 min으로 나타나 석탄계 재질의 BAC가 anthracite biofilter 보다 1.6~1.8배 정도 큰 k 를 나타내는 것으로 조사되었다.

수온이 5°C~25°C일 때 2-MIB에 대한 석탄계 재질의 BAC에서의 k 는 0.0559~0.2071 min^{-1} 으로 나타나 수온이 5°C에서 25°C로 증가하면 k 는 3.7배 정도 증가하며 $t_{1/2}$ 는 12.40 min에서 3.35 min으로 감소하였다. 야자계와 목탄계 재질의 BAC 및 anthracite biofilter의 경우도 유입수의 수온 상승에 따라서 k 가 증가함에 따라 $t_{1/2}$ 가 감소하였으며, 또한 재질별 비교에서는 석탄계 BAC가 야자계와 목탄계 BAC 보다 1.1~1.5배 정도 큰 k 를 나타내었고, anthracite biofilter 보다는 1.7~1.8배 정도 큰 k 를 나타내었다. 그리고 석탄계 BAC와 anthracite biofilter를 대상으로 하여 geosmin과 2-MIB에 대한 물질별 k 와 $t_{1/2}$ 를 비교한 결과에서는, 석탄계 BAC의 경우 geosmin이 2-MIB 보다 k 가 1.3~1.4배 정도 큰 것으로 나타났으며, anthracite biofilter에서도 geosmin이 1.3~1.5배 정도 큰 것으로 나타나 geosmin이 2-MIB보다 생분해가 더 용이한 것으로 나타났다.

Table 4(b)에는 석탄계 재질의 BAC에서 유입수의 수온 5°C와 25°C에서 BOM 농도변화에 따른 geosmin과 2-MIB의 k 와 $t_{1/2}$ 를 나타내었다. 유입수 수온 5°C와 25°C에서 low BOM 조건일 때 geosmin에 대한 k 는 0.0766 min^{-1} 과 0.2897 min^{-1} 이었으며, middle 및 high BOM 조건에서는 0.0742 min^{-1} 과 0.2972 min^{-1} 및 0.0622 min^{-1} 과 0.2250 min^{-1} 로 각각 나타나 수온 5°C와 25°C에서 low와 middle BOM 조건에서의 k 는 큰 차이를 나타내지는 않았으나, 비교적 BOM 농도가 높은 high BOM 조건에서는 k 가 low BOM 조건 보다 1.2~1.3배 정도 감소하였다. 또한 2-MIB의 경우도 low BOM 조건이 high BOM 조건 보다 k 가 1.4배 정도 큰 것으로 나타나 geosmin과 매우 유사한 경향을 나타내었다.

4. 결론

생물활성탄(BAC) 재질별 및 anthracite biofilter에서 EBCT 및 수온변화에 따른 geosmin 과 2-MIB의 생분해 특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) EBCT와 수온을 증가시킬 경우 geosmin과 2-MIB의

제거율이 증가 하였으며, 수온이 높을 경우(25°C) geosmin과 2-MIB의 제거능은 EBCT의 영향을 크게 받지 않는 것으로 나타났다. 그러나 수온이 5°C 정도로 낮을 경우는 EBCT의 증가가 geosmin과 2-MIB의 제거율에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

2) 활성탄 재질별 BAC 및 anthracite biofilter에서 geosmin과 2-MIB의 제거는 석탄계 재질에서의 생물분해능이 가장 높았으며, 다음으로 야자계, 목탄계, anthracite 순으로 나타났다.

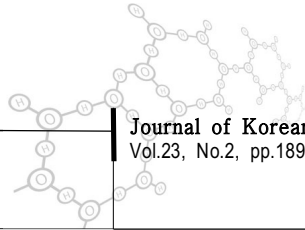
3) BAC 공정에서 생물분해에 의한 50% 이상의 geosmin과 2-MIB의 제거효율을 얻기 위해서는 수온 5°C에서는 10분 이상의 EBCT, 수온 15°C 이상에서는 5분의 EBCT가 요구되었다.

4) BOM 농도변화에 따른 geosmin과 2-MIB에 대한 생물분해능은 BOM농도가 가장 높을 때 geosmin과 2-MIB의 분해능은 오히려 감소하였으며, low BOM과 middle BOM의 경우 제거율에 큰 차이를 보이지 않았다.

5) 수온 5°C~25°C, 석탄계 BAC, low BOM 조건에서 geosmin과 2-MIB에 대한 생물분해 속도상수(k)와 반감기($t_{1/2}$)는 0.0766~0.2897 min⁻¹와 0.0559~0.2071 min⁻¹ 이었으며, 반감기는 2.39~9.05분과 3.35~12.40분 이었으며, BOM 농도를 증가시킬 경우 반감기는 3.08~11.14분과 4.60~17.86분 이었다.

참고문헌

1. APHA, AWWA and WEF (1998) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th ed., Washington DC. US.
2. Bell, R.T., Ahlgren, G.M. and Ahlgren, I. (1983) Estimating bacterioplankton production by the [³H]thymidine incorporation in a eutrophic Swedish Lake, *Appl. Environ. Microbiol.*, **45**, pp.1709-1721.
3. Bruce, D., Westerhoff, P. and Brawley, C.A. (2002) Removal of 2-methylisoborneol and geosmin in surface water treatment plants in Arizona, *J. Water Supply: Research and Technology-Aqua*, **51**(4), pp.183-197.
4. Elhadi, S.L.N., Huck, P.M. and Slawson, R.M. (2004) Impact of biomass concentrations on the removal of earthy/musty odors from drinking water by biological filters, *Proceedings of 2004 AWWA Annual Conference*, June 13-17, Orlando, Florida.
5. Ferguson, D.W., McGuire, M.J., Koch, B., Wolfe, R.L. and Aieta, E.M. (1990) Comparing peroxone and ozone for controlling taste and odor compounds, disinfection by-products, and microorganisms, *J. AWWA*, **82**(4), pp.181-191.
6. Fuhrman, J.A. and Azam, F. (1982) Thymidine incorporation as a measure of heterotrophic bacterioplankton production in marine surface waters: evaluation and field results, *Mar. Biol.*, **66**, pp.109-120.
7. Herzing, D.R., Snoeyink, V.L. and Wood, N.F. (1977) Activated carbon adsorption of odorous compounds 2-methylisoborneol and geosmin, *J. AWWA*, **69**(4), pp.223-231.
8. Lalezary, S., Pirbazari, M. and McGuire, M.J. (1986) Evaluating activated carbons for removing low concentrations of taste-producing and odor-producing organics, *J. AWWA*, **78**(11), pp.76-82.
9. Melin, E., Eikebrokk, B., Brugger, M. and Ødegaard, H. (2002) Treatment of humic surface water at cold temperatures by ozonation and biofiltration, *Wat. Sci. Tech.: Wat. Supply*, **2**(5-6), pp.451-457.
10. Meng, A.K. and Suffet, I.H. (1997) A procedure for correlation of chemical and sensory data in drinking water samples by principal component factor analysis, *Environ. Sci. Technol.*, **31**, pp.337-345.
11. Metcalf and Eddy, Inc. (1991) *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse*, 3rd Edition, McGraw-Hill Inc., New York.
12. Moll, D.M., Summers, R.S., Fonseca, A.C. and Matheis, W. (1999) Impact of temperature on drinking water biofilter performance and microbial community structure, *Environ. Sci. Technol.*, **33**(14), pp.2377-2382.
13. Nerenberg, R., Rittman, B.E. and Soucie, W.J. (2000) Ozone/biofiltration for removing 2-MIB and geosmin, *J. AWWA*, **92**(12), pp.85-95.
14. Parsons, T.R., Maita, Y. and Lalli, C.M. (1984) *A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis*, Pergamon, New York.
15. Rittman, B.E., Gantzer, C.J. and Montiel, A. (1995) Biological treatment to control taste and odor compounds in drinking water treatment, *In Advances in the Control of Tastes and Odors in Drinking Water*, AWWARF, Denver, CO., USA.
16. Rosen, A.A., Mashni, C.I. and Safferman, R.S. (1970) Recent developments in the chemistry of odor in water: the cause of earthy/musty odor, *Water Treat. Examin.*



- 19, pp.106.
17. Suffet, I.H., Mallevalle, J. and Kawczynski, E. (1995) *Advances in Taste-and-Order Treatment and Control*, AWWARF, Denver, CO., USA
18. Urfer, D. (1998) *Effects of Oxidants on Drinking Water Biofilters*, Ph.D thesis, Dept. of Civil Engineering, University of Waterloo, Waterloo, ON, Canada.
19. Westerhoff, P., Summer R.S. and Kommineni S. (2005) *Ozone-enhanced biofiltration for geosmin and MIB removal*. AWWARF, Denver CO., USA.
20. 김영웅, 손희중, 유명호, 이춘식, 조인철, 김은호, 성낙창 (2000) 정수처리공정 중 침전지 부착조류 특성과 이취발생에 관한 연구, *대한환경공학회지*, 22(5), pp.887-894.
21. 배상대, 손희중, 정철우 (2008) 활성탄과 생물여과 공정에서의 Chloral hydrate 제거 특성, *대한환경공학회지*, 30(2), pp.218-224.
22. 손희중 (2001) 회전 드럼형 광촉매 산화장치를 이용한 비스페놀-A 제거, *한국화학공학회지*, 39(4), pp.493-500.
23. 손희중, 박흥기, 이수애, 정은영, 정철우 (2005) 생물활성탄 공정에서 활성탄 재질에 따른 부착미생물 군집특성, *대한환경공학회지*, 27(12), pp.1311-1320.
24. 이화자, 손희중, 노재순, 이상원, 지기원, 유평중, 강임석 (2006) 오존과 과산화수소를 이용한 이취미 물질 산화 제거, *대한환경공학회지*, 28(12), pp.1323-1330.
25. 이화자 (2007) *수돗물의 냄새 유발물질 분석 및 처리*, 부경대학교 환경공학과 박사논문.
26. 이화자, 손희중, 이철우, 배상대, 강임석 (2007) 활성탄 재질과 사용연수에 따른 geosmin과 2-MIB 흡착특성, *대한환경공학회지*, 29(4), pp.404-411.
27. 長澤 (1990) 粒狀活性炭表層における微生物の動向, *第41回日本水道研究発表會 發表論文集* pp.1-3.