

완속 모래여과 공정에서의 Geosmin 제거 특성 Removal Characteristics of Geosmin in a Slow Sand Filtration Process

손희종[†] · 염훈식 · 장성호*
Hee-Jong Son[†] · Hoon-Sik Yoom · Seong-Ho Jang*

부산광역시 상수도사업본부 · *부산대학교 지역환경시스템공학과
Busan Water Authority · *Department of Environment System Engineering, Pusan National University

(2010년 5월 31일 접수, 2010년 8월 18일 채택)

Abstract : Geosmin removal by biodegradation was investigated in lab-scale slow sand filtration column with different empty bed contact times (EBCTs) and water temperature. Schmutzdecke layer was built up after 30 days operation and biomass and activity were 4.5×10^6 CFU/g and $3.42 \text{ mg} \cdot \text{C}/\text{m}^3 \cdot \text{hr}$, respectively. The attached bio-film microorganisms in schmutzdecke layer were isolated and identified. The dominant species was *Pseudomonas sp.* that had occupied 56%. Removal efficiencies of dissolved organic carbon (DOC) and geosmin were 27% and 95% after 30 days operation. In lab-scale slow sand filtration column, geosmin and DOC removal efficiencies were 62% and 10% at 5°C, respectively. And increasing water temperature (15°C and 25°C) increased the geosmin and DOC removal efficiencies (88~100% and 25~42%) in lab-scale slow sand filtration column. Geosmin and DOC biodegradation rates (k) in the schmutzdecke layer (in the upper 5 cm filter bed) were $1.842 \sim 15.965 \text{ hr}^{-1}$ and $0.253 \sim 1.123 \text{ hr}^{-1}$, respectively. It were about 18~32 times and 20~51 times of the rates in the deeper filter bed (5~60 cm).

Key Words : Slow Sand Filtration, Schmutzdecke Layer, Geosmin, Biofilm, Biodegradation

요약 : 완속 모래여과 컬럼의 생물막(schmutzdecke)은 운전 시작 30일 정도에 정상상태에 도달하는 것으로 나타났으며, 생체량과 활성도는 각각 4.5×10^6 CFU/g과 $3.42 \text{ mg} \cdot \text{C}/\text{m}^3 \cdot \text{hr}$ 로 나타났다. 정상상태에 도달한 생물 여과층의 박테리아 중 분포는 *Pseudomonas sp.*가 차지하는 비율이 56%였으며 그 중에서 *Pseudomonas fluorescens*가 전체비율의 22%를 차지하였다. 운전 시작 30일 후의 용존 유기탄소(dissolved organic carbon, DOC)와 geosmin의 제거율은 각각 27%와 95%로 나타나 최대의 제거율을 나타내었으며, 그 이후에는 DOC와 geosmin의 제거율에는 큰 변화가 없었다. 수온 변화에 따른 DOC와 geosmin의 제거율 변화에서 유입수의 수온이 5°C일 경우 geosmin과 DOC의 평균 제거율은 각각 62%와 10%로 나타났으나 수온을 15°C와 25°C로 증가시켰을 경우에는 geosmin과 DOC의 평균 제거율이 각각 88%와 25% 및 100%와 42%로 나타났다. 수온 변화에 따른 완속 모래여과 컬럼의 상부 생물막 층에서의 geosmin과 DOC에 대한 생물분해 속도상수(k)는 $1.842 \sim 15.965 \text{ hr}^{-1}$ 와 $0.253 \sim 1.123 \text{ hr}^{-1}$ 이었고, 상부의 생물막 층이 그 하부 보다 DOC와 geosmin에 대한 생물분해 속도상수가 각각 18~32배 및 20~51배 정도 큰 것으로 나타났다.

주제어 : 완속 모래여과, 생물 여과막, 지오스민, 생물막, 생물분해

1. 서론

완속 모래여과(slow sand filtration) 공정은 1829년 이후 영국에서 안전한 정수의 생산을 위해 사용되기 시작하여 20세기 중반까지 대표적인 정수처리 공정으로 사용되어져 왔다.¹⁾ 완속 모래여과 공정에서의 오염물질 정화작용은 햇빛과 산소의 공급이 원활한 표층 수 cm 이내에서 미생물이 성장하고, 모래여과 표면에 부착하여 형성된 생물 여과막(schmutzdecke)에서 이루어진다. 입자상 오염물질들은 여재 표면의 생물여과막의 점액질에 부착되어 제거되며, 용존성 오염물질의 경우는 생물막 층에 존재하는 다양한 미생물들에 의해 생물분해(biodegradation) 된다.^{2,3)} 생물여과막에서 제거 가능한 오염물질들은는 탁도, 유기물질, 철, 망간, 암모니아, 바이러스, 병원성 미생물 등 매우 다양하며, 제거율도 높은 것으로 알려져 있다.^{4,5)} 국내의 완속 모래여과 공정을 채택한 정수장 현황을 보면 대부분이 소규모 정수장으로 약 200여 곳에서 완속 모래여과 공정을 채택하여 운전 중

인 것으로 알려져 있다.^{6,7)} 완속 모래여과 공정은 급속 모래여과 공정에 비해 상대적으로 건설비가 저렴하고, 응집제와 같은 약품투입이 필요 없어 유지관리가 용이하다는 장점이 있다. 그러나 여과속도가 느리고, 넓은 면적의 부지가 필요하며, 급작스러운 오염사고가 발생할 경우 후속대책을 마련하기가 곤란하다는 단점이 있다.¹⁾ 외국의 경우는 최근에 문제시되고 있는 수중의 잔류 의약품질과 같은 미량오염물질들에 대해 완속 모래여과 공정에서의 제거능을 연구하는 등 완속 모래여과 공정에 대한 지속적인 관심을 가지고 있다.⁸⁾

국내의 경우 상수 원수의 대부분을 강이나 하천 및 호소수와 같은 표류수를 이용하고 있어 *Oscillatoria sp.*, *Anabaena sp.* 및 *Phormidium sp.*와 같은 남조류나 방선균에 의해서 생성되는 geosmin과 같은 이취물질에 대해 매우 민감한 실정이다.⁹⁾ 이취 물질은 인체에 직접적인 위해성을 나타내지는 않으나 수돗물에 대한 불신을 초래하여 미국 등 선진국에서도 정수처리 공정에서 이취물질의 제거에 많은 투자와

[†] Corresponding author E-mail: menuturk@hanmail.net Tel: 051-669-4625 Fax: 055-323-4719

관심을 기울이고 있다.¹⁰⁻¹⁴⁾ 이들 물질의 역치농도(threshold concentration)는 개인별로 차이는 있으나 6~10 ng/L^{15,16)} 정도로 알려져 있어 수돗물에 매우 낮은 농도로 함유되어 있어도 민원을 유발한다. 따라서 완속 모래여과 공정을 운전 중인 소규모 정수장에 geosmin과 같은 이취물질이 유입되었을 경우 제거효율을 증진하기 위한 대책이 없는 실정이며, 정수장 운전인력의 경우도 전문성이 결여되어 있어 민원발생의 가능성이 매우 높은 실정이다. 일반적으로 정수처리 공정에서 geosmin의 제거를 위해서는 오존을 이용한 산화,¹⁷⁾ 입상활성탄을 이용한 흡착¹⁸⁾ 및 생물활성탄을 이용한 생물분해¹⁹⁾와 같은 고도 정수처리 공정의 도입이 필요하다. 그러나 소규모로 운영되는 정수장의 경우 전문적인 운전인력과 운전 경험이 필요한 고도 정수처리 공정의 도입이 불가능한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 소규모 정수장에서 채택하고 있는 완속 모래여과 공정에서의 geosmin의 제거능을 파악하고자, 실험실 규모의 완속 모래여과 컬럼을 이용하여 운전 초기부터 운전 기간에 따른 컬럼 상부의 생물막(schmutzdecke) 층에서의 미생물 부착 특성을 조사하였고, 완속 모래여과 컬럼의 부착 박테리아 군집이 정상상태(steady-state)에 도달한 후에는 유입수의 수온을 변화시켜 수온변화에 따른 유기물 제거특성과 함께 geosmin에 대한 생분해 특성을 평가하여 원활한 완속 모래여과 공정의 운전을 위한 기초자료를 제공하고자 하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 유입수 성상

유입수는 완속 모래여과 공정을 운영중인 부산시 B 정수장의 침사 처리 후 완속 모래여과 공정 유입수(유입수)를 실험에 사용하였다. Geosmin은 sigma-aldrich사의 standard급 물질을 유입수에 직접 투입하여 유입되는 geosmin의 농도가 100 ng/L가 되도록 하였다. 실험 기간 중의 유입수 성상을 Table 1에 나타내었다.

2.2. 실험실 규모 완속 모래여과 컬럼 및 운전

본 실험에 사용된 실험실 규모의 완속 모래여과 컬럼은 직경 5 cm의 아크릴 재질로 컬럼의 높이 100 cm였으며, water jacket을 이용하여 컬럼 내부의 온도를 일정하게 유지할 수 있도록 설계하였다. 실험에 사용된 완속 여과사의 유효경(effective size)은 0.3 cm, 균등계수는 1.3이었고, 실험에 사용하기 전에 완속 여과사를 증류수로 깨끗이 세척한

Table 1. Characteristics of influent of laboratory slow sand filter column

	pH	Chl-a	Turbidity	DOC
	(-)	(mg/m ³)	(NTU)	(mg/L)
Influent water	6.7~7.1	21~42	3.0~5.1	3.0~3.4

후 120℃에서 충분히 건조시켜 실험에 사용하였다. 완속 모래여과 컬럼에 여과사를 60 cm 충전하였으며, 여과장치 하부에는 입경 0.5 cm 정도의 자갈을 5 cm 충전하여 상부의 완속 여과사 층을 지지하도록 하였다. 완속 모래여과 컬럼은 유입수 저장조에서 농도가 100 ng/L인 geosmin을 정량 펌프를 사용하여 컬럼의 상부로 이송시켜 여과속도를 0.167 m/hr (4 m/day)로 고정하여 운전하였다. 여층 깊이 5 cm, 10 cm, 20 cm, 40 cm 및 60 cm(최종 처리수)에 따른 접촉 시간(empty bed contact time, EBCT)은 0.3 hr, 0.6 hr, 1.2 hr, 2.4 hr 및 3.6 hr이었다. 유입수의 수온은 완속 모래여과 공정 컬럼 상부에 온도계를 설치, 운전 시작부터 운전 기간 50일까지는 수온조절 장치(Buchi, Recirculating chiller B-740, Swiss)를 이용하여 수온을 20℃로 고정하여 운전하였으며, 생물막 층이 정상상태에 도달한 후에는 수온변화에 따른 geosmin과 DOC 제거능 평가실험을 위하여 각각의 수온조건(5℃, 15℃ 및 25℃)에서 15일간 순응시킨 후 수온변화에 따른 geosmin과 DOC 제거능 실험을 실시하였다. 완속 모래여과 컬럼에 대한 개략도를 Fig. 1에 나타내었다.

2.3. 분석

Geosmin의 분석은 polydimethylsiloxane(PDMS)이 코팅되어 있는 교반막대(Twister™, Gerstel, Germany)에 geosmin을 흡착시켜 수중에서 분리하는 교반막대 흡착추출법(stir

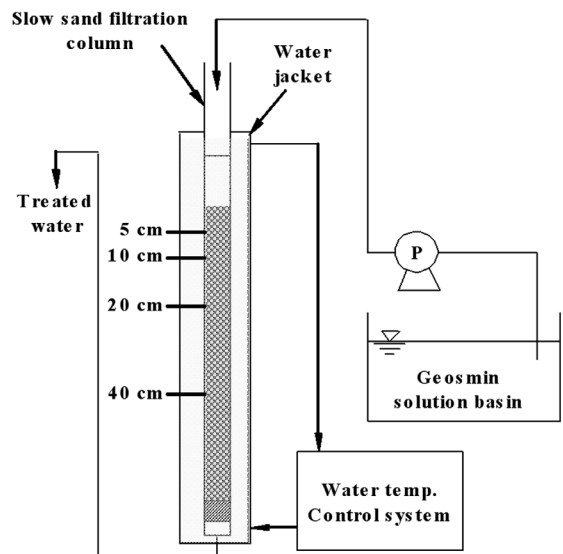


Fig. 1. Schematic diagram of lab-scale slow sand filter column.

Table 2. Analytical conditions of the GC/MSD

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

bar sorptive extraction: SBSE)을 전처리 법²⁰⁾으로 사용하여 GC/MSD로 분석하였으며, GC/MSD의 분석조건을 Table 2에 나타내었다.

용존유기탄소(dissolved organic carbon, DOC)은 0.45 µm 멤브레인 여지로 시료수를 여과하여 TOC 분석기(Sievers 820, Sievers, USA)로 분석하였다.

완속 모래여과 컬럼의 상부 생물막 층에 부착된 종속영양 박테리아의 생체량(biomass)의 측정은 완속 모래 여과사 습증량 1 g을 37 kHz, 190 W로 3분 동안 초음파 처리(DHA 1000, Branson, U.S.A.)하여 세균을 탈리²¹⁾시킨 후 R₂A agar (Difco) 평판배지²²⁾에 시료 1 mL를 단계적으로 희석 도달한 후 25°C 배양기에서 2주간 배양하여 습증량 1 g당 colony 형성 세균수로 표시하였다. 또한, 부착 종속영양 박테리아의 활성도(activity) 측정은 ³H-thymidine이 박테리아의 DNA에 흡수되는 정도로 구하였다.²³⁾ 시료수 2 mL에 200 nM [methyl-³H] thymidine 용액(specific activity: 40~50 Ci/mmol) 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°C에서 1시간 동안 가열하여 DNA를 추출·냉각시켜 3,000 rpm에서 10분간 원심분리 후 상등액 1 mL에 ice-cold 10% trichloroacetic acid 5 mL를 첨가하여 반응을 종료시키고 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 (disintergrate per minute) 값으로부터 Parsons 등²⁴⁾에 의한 식을 이용하여 incorporation된 thymidine의 양을 계산하였다.²⁵⁾

3. 결과 및 고찰

3.1. 운전 기간에 따른 생물막 부착 특성

실험에 사용된 완속 모래여과 컬럼의 운전 기간에 따른 상부 생물막 층의 부착 박테리아 생체량(biomass)과 활성도(activity)를 측정하여 Fig. 2에 나타내었으며, 유입수의 수온은 20°C로 고정하여 운전하였다. Fig. 2에 나타낸 생체량과 활성도 결과를 살펴보면 전체적으로 운전 기간이 증가할수록 점진적으로 생체량과 활성도가 증가하는 추세를 보이고 있으며, 생체량과 활성도 모두 운전 30일 후에 각각 4.5×10⁶ CFU/g과 3.42 mg·C/m³·hr로 최대값을 나타내었다. 30일 이후에는 생체량과 활성도 모두 정상상태에 도달하여 그 이후에는 큰 변화를 보이지 않았다. 활성도의 경우는 운전 5일째에 1.40 mg·C/m³·hr로 나타나 최대값을 나타낸 30일째의 41% 정도로 나타났으며, 생체량의 경우는 최대값을 나타낸 30일째에 비하여 0.9% 정도의 비율을 나타내어 운전 초기에는 박테리아의 활성도 보다 생체량의 구성비율이 낮게 나타나고 있다.

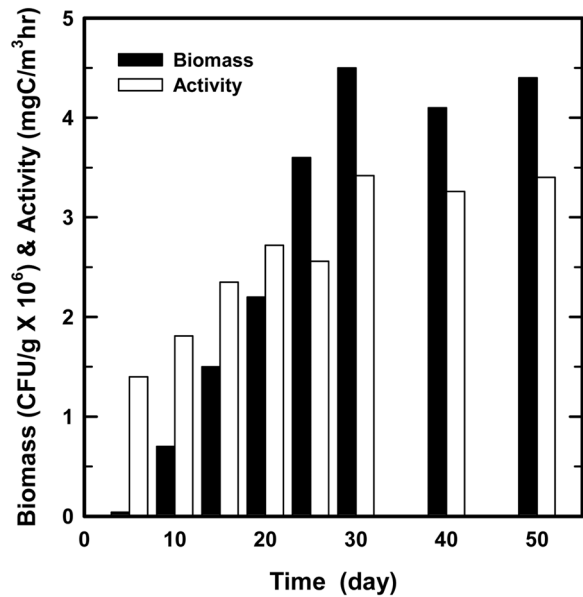


Fig. 2. Variation of biomass and activity during operation period in the slow sand filtration column (Top : 0~5 cm).

실험에 사용된 완속 모래여과 컬럼이 정상상태에 도달한 운전시작 30일 이후에 상층의 생물막 층을 채집하여 SEM 촬영을 한 것을 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 다양한 박테리아들의 군집을 볼 수 있으며, Table 3에는 박테리아들의 군집에서 각각의 박테리아들에 대한 종 분포를 나타낸 것으로 총 13종의 박테리아들이 서식하는 것으로 나타났다. 전체 박테리아들의 군집에서 *Pseudomonas* sp.가 차지하는 비율이 56%로 매우 높은 것을 알 수 있으며, 그 중에서 *Pseudomonas fluorescens*가 전체비율의 22%를 차지하는 것으로 나타났다.

3.2. 운전 기간에 따른 DOC와 geosmin 제거 특성

완속 모래여과 컬럼의 운전 기간에 따른 DOC와 geosmin 제거율을 Fig. 4에 나타내었으며, 유입수의 수온은 20°C로 고정하여 운전하였다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 운전 시작 5일경에는 부착 박테리아들의 군집이 형성되기 전이기 때문

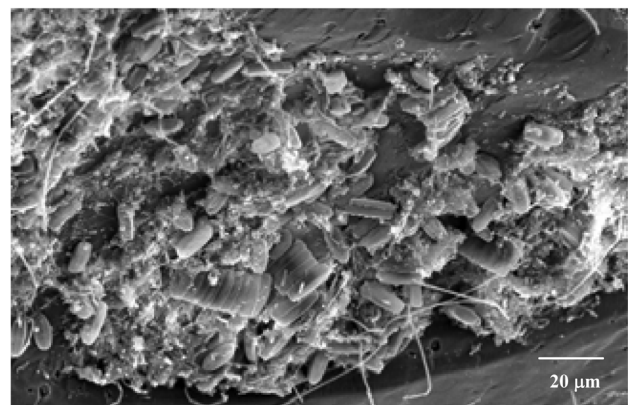


Fig. 3. SEM image of biofilm at top of slow sand filtration column.

Table 3. Distribution of bacteria isolated in slow sand filtration column

Bacterial identification	% population
<i>Acinetobacter alcaligen</i>	2
<i>Alcaligenes faecalis</i>	5
<i>Flavobacterium breve</i>	2
<i>Flavobacterium indolgenes</i>	2
<i>Flavobacterium meningosepicum</i>	2
<i>Pasteurella haemolytica</i>	5
<i>Pseudomonas vesicularis</i>	11
<i>Pseudomonas aureofaciens</i>	8
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	22
<i>Pseudomonas cepacia</i>	15
<i>Sphingomonas paucimobilis</i>	5
<i>Bacillus</i> spp.	12
<i>Micrococcus</i> spp.	9

에 DOC와 geosmin의 제거율이 각각 2%와 6.8%로 나타나 매우 낮은 제거능을 보이고 있으며, 운전기간이 증가할수록 DOC와 geosmin의 제거율은 급격히 증가하고 있다. 운전 시작 30일 경에는 DOC와 geosmin의 제거율이 각각 27.4%와 94.9%로 나타나 최대의 제거율을 나타내었으며, 운전 시작 30일 이후에는 DOC와 geosmin의 제거율에는 큰 변화가 없었다. 따라서 Fig. 2에서와 같이 완속 모래여과 컬럼의 경우 운전 시작 30일 경에 상층 생물막(schmutzdecke) 층의 박테리아 생체량과 활성도가 최대가 되어 유기성 오염물질의 제거능도 최대의 효율을 보이는 것으로 나타났다.

3.3. 수온변화에 따른 DOC와 geosmin 제거 특성

실험에 사용된 완속 모래여과 컬럼을 이용하여 컬럼 상층

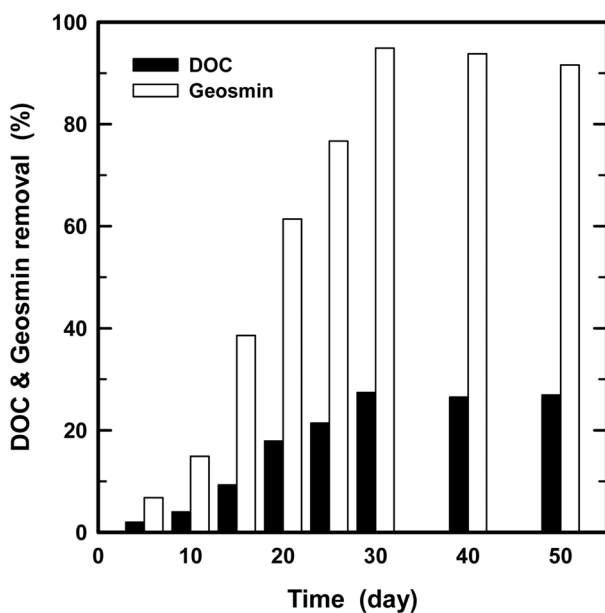


Fig. 4. Variation of DOC and geosmin removal efficiencies during operation period in the slow sand filtration column (water temp. : 20°C).

의 생물막(schmutzdecke) 층이 충분히 정상상태에 도달한 운전 시작 50일 이후에 유입수의 수온 변화에 따른 geosmin과 DOC의 제거능을 평가한 것을 Fig. 5에 나타내었다. 유입수의 수온을 변경한 후 15일간의 수온 변화에 대한 반응 기간을 거친 후 실험을 진행하였다. 유입수의 수온이 5°C 일 경우 geosmin과 DOC의 평균 제거율은 각각 62%와 10%로 나타났으나 수온을 15°C와 25°C로 증가시켰을 경우에는 geosmin과 DOC의 평균 제거율이 각각 88%와 25% 및 100%와 42%로 나타나 수온 증가에 따라 이들의 제거율도 월등히 증가하는 경향을 보였다. 수온의 증가에 따른 DOC와 geosmin의 제거율 증가에서 geosmin 보다는 DOC의 증가 추세가 더욱 뚜렷하게 나타나고 있으며, 이는 geosmin의 경우는 중속 영양성 박테리아들이 쉽게 유기 탄소원으로 섭취가 가능한 저분자 유기물질인데 반해 수중의 DOC의 경우는 다양한 유기물질들이 혼합되어 있기 때문에 활성도(activity)가 떨어진 박테리아들이 쉽게 유기 탄소원으로 이용하기에는 어려움이 있다. 생물활성탄 공정에서의 이취물질 제거능을 평가한 손 등¹⁹⁾은 수온이 저하될 경우 생물활성탄의 부착 박테리아들의 생체량(biomass) 보다 활성도(activity) 저하가 유기성 기질들의 제거에 미치는 영향이 더 큰 것으로 보고하고 있다.

3.4. Geosmin 제거 동력학

실험에 사용된 완속 모래여과 컬럼의 여재층 깊이에 대응하는 접촉시간(EBCT)에 따른 geosmin의 제거속도 상수(k)를 Fig. 6에 나타내었다. Geosmin의 제거가 1차 반응을 따른다고 가정할 경우, 아래 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

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

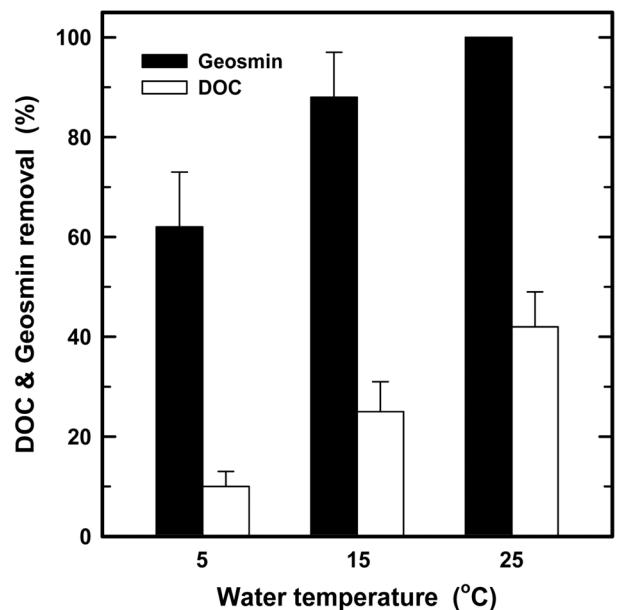


Fig. 5. Variation of DOC and geosmin removal efficiencies for various water temperatures in the slow sand filtration column.

여기서 C는 반응시간 후의 농도이고, C₀는 초기농도로 1이며, k는 생물분해 속도상수, t는 반응시간(EBCT)이다. 식 (1)을 이용하여 여러 실험조건에서 도출된 결과를 회귀분석하여 생물분해 속도상수 k를 구하였다. 또한, geosmin의 50% 제거시점인 반감기(half-life, t_{1/2})를 식 (2)로 구하였다.

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

완속 모래여과 컬럼 상층의 생물막(schmutzdecke) 층이 정상상태 구간인 운전 시작 50일 이후에 수온 변화에 따른 geosmin과 DOC의 생물분해능을 평가하였다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 완속 모래여과 컬럼의 표층(5 cm 이내)에서의 제거속도와 5 cm 아래의 여재층 내부에서의 제거속도가 다른 두 개의 직선식으로 해석할 수 있다. 완속 모래여과 공정에서의 자연유기물질(NOM) 제거 특성을 평가한 박 등의 연구²⁶⁾에서는 상부의 생물막 층에서의 NOM 제거속도가 생물막 층 하부에 비해 20배 정도 빠르다고 보고하고 있다. 본 연구에서는 수온 변화에 따른 geosmin과 DOC에 대해 상부 생물막(schmutzdecke) 층과 그 하부의 구간으로 나누어 평가하였으며, Fig. 6(a)에 나타낸 geosmin의 경우를 보면 수온이 5°C일 경우 schmutzdecke 층에서의 생분해 속도상수(k)는 1.842 hr⁻¹로 나타난 반면 그 하부에서의 생분해 속도상수(k)는 0.101 hr⁻¹로 나타나 schmutzdecke 층에서의 geosmin의 생분해가 18.2배 정도 빠른 것으로 조사되었다. 수온을 15°C와 25°C로 하였을 경우에는 상부의 활성층인 schmutzdecke 층이 그 하부에 비해 각각 21.1배와 31.6배 정도 빠른 것으로 나타났다. Fig. 6(b)에 나타낸 DOC의 경우는 수온이 5°C일 경우 schmutzdecke 층에서의 생분해 속도상수(k)는 0.253 hr⁻¹로 나타난 반면 그 하부에서의 생분해 속도상수(k)는 0.005 hr⁻¹로 나타나 schmutzdecke 층에서의 DOC의 생분해가 50.6배 정도 빠른 것으로 조사되었으며, 수온을 15°C와 25°C로 증가시켰을 경우에는 42.4배와 19.7배 정도 빠른 제거능을 보였다. 또한, 수온이 5°C에서 25°C로 증가하였을 경우 상부의 활성층인 schmutzdecke 층에서의 geosmin과 DOC에 대한 생물분해 속도상수를 비교해 보면 각각 8.7배와 4.4배 증가하였으나, schmutzdecke 층 하부에서의 geosmin과 DOC에 대한 생물분해 속도상수의 경우는 geosmin과 DOC 각각 5배와 11.4배 증가하였다. Geosmin의 경우는 수온 증가에 따라 schmutzdecke 층에서의 생물분해 속도상수의 증가폭이 큰 반면에 DOC의 경우는 schmutzdecke 층의 하부에서의 생물분해 속도상수의 증가폭이 크게 나타나고 있다. 이는 geosmin의 경우 DOC에 비해 저분자 물질이며, 앞선 여러 연구들^{14,19,27,28)}에서 종속 영양성 박테리아들이 유기 탄소원으로 쉽게 이용이 가능한 것으로 보고하고 있어 수온 증가에 따라 박테리아들의 활성이 증가하여 상층부에서 유입된 geosmin의 많은 부분이 직접 생물분해된 것으로 보이며, DOC의 경우는 난분해성 물질을 포함하여 다양한 분자량대의 유기물질들이 혼재하고 있기 때문에 수온 증가에 따른 schmutzdecke 층에서의 활성 증가

로 박테리아들이 직접 섭식하여 바로 생물분해가 가능한 물질들은 schmutzdecke 층에서 생물분해가 이루어지나, 난분해성이며 고분자 유기물질의 경우는 schmutzdecke 층에서 군집을 이루고 있는 박테리아들이 분비하는 효소에 의해 변형·분해되어^{29,30)} 완전히 무기화되지 않고 변형되고 저분자화된 DOC 구성물질들이 컬럼의 하부로 이동하면서 schmutzdecke 층 하부에 서식하는 박테리아들에 의해 서서히 분해가 이루어진 것으로 판단된다.³¹⁾ Table 4에는 수온 변화에 따른 schmutzdecke 층과 그 하부에서의 geosmin 및 DOC에 대한 생물분해 속도상수(k)와 반감기(t_{1/2})를 나타내었다.

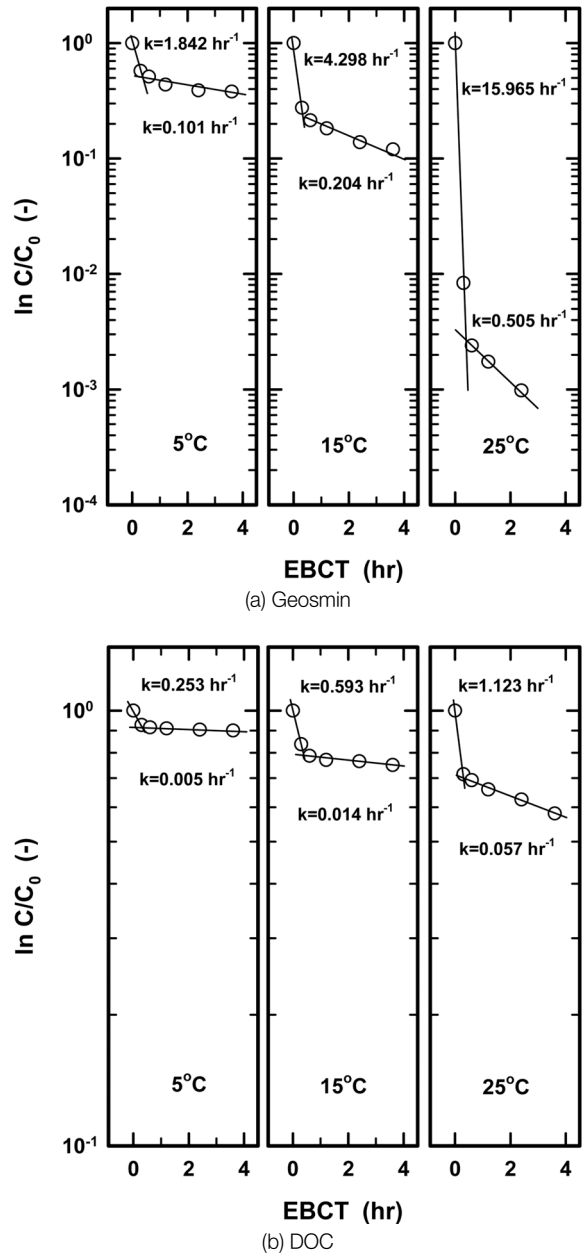


Fig. 6. Geosmin and DOC biodegradation rate constant (k) for various water temperatures in the slow sand filtration column.

Table 4. Biodegradation rate constants, and half-lives for geosmin and DOC biodegradation at various water temperatures in slow sand filtration column

Water temp.	Pollutant	Bed depth (cm)	Rate constant, k (hr ⁻¹)	Half-life, t _{1/2} (hr)
5℃	geosmin	0~5	1.842	0.376
		10~60	0.101	6.861
	DOC	0~5	0.253	2.739
		10~60	0.005	138.600
15℃	geosmin	0~5	4.298	0.161
		10~60	0.204	3.397
	DOC	0~5	0.593	1.169
		10~60	0.014	49.500
25℃	geosmin	0~5	15.965	0.043
		10~60	0.505	1.372
	DOC	0~5	1.123	0.617
		10~60	0.057	12.158

6. 결론

실험실 규모의 완속 모래여과 컬럼을 이용하여 운전 기간에 따른 생물막(schmutzdecke) 층에서의 미생물 부착 특성과 수온변화시 geosmin에 대한 생분해 특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 완속 모래여과 컬럼의 생물막(schmutzdecke)은 운전 시작 30일 이후에 정상상태에 도달하는 것으로 나타났으며, 생체량과 활성도는 각각 4.5×10^6 CFU/g과 $3.42 \text{ mg} \cdot \text{C}/\text{m}^3 \cdot \text{hr}$ 로 나타났다.

2) 완속 모래여과 컬럼의 생물막의 종 분포는 *Pseudomonas* sp.가 차지하는 비율이 56%로 나타났고, 그 중에서 *Pseudomonas fluorescens*가 전체비율의 22%를 차지하였다.

3) 운전 기간에 따른 DOC와 geosmin의 제거율 변화를 살펴본 결과, 운전 시작 30일 경에 DOC와 geosmin의 제거율이 각각 27.4%와 94.9%로 나타나 최대의 제거율을 나타내었으며, 그 이후에는 DOC와 geosmin의 제거율에는 큰 변화가 없었다.

4) 수온 변화에 따른 DOC와 geosmin의 제거율 변화에서 유입수의 수온이 5℃일 경우 geosmin과 DOC의 평균 제거율은 각각 62%와 10%로 나타났으나 수온을 15℃와 25℃로 증가시켰을 경우에는 geosmin과 DOC의 평균 제거율이 각각 88%와 25% 및 100%와 42%로 나타났다.

5) 수온 변화에 따른 완속 모래여과 컬럼의 상부 생물막(schmutzdecke) 층에서의 geosmin과 DOC에 대한 생물분해 속도상수(k)는 $1.842 \sim 15.965 \text{ hr}^{-1}$ 와 $0.253 \sim 1.123 \text{ hr}^{-1}$ 이었고, 상부의 생물막 층이 그 하부 보다 DOC와 geosmin에 대한 생물분해 속도상수가 각각 18~32배 및 20~51배 정도 큰 것으로 나타났다.

KSEE

참고문헌

- Gary, S. L., Slow Sand Filtration, ASCE, New York(1991).
- Fox, K. B., Miltner, R. J., Logsdon, G. S., Dicks, D. L. and Drolet, J. J., "Pilot-plant studies of slow-rate filtration," *J. AWWA*, **76**(12), 62~68(1984).
- Bellamy, W. D., Silverman, G. P., Hendricks, D. W. and Logsdon, G. S., "Removing Giardia cysts with slow sand filtration," *J. AWWA*, **77**(2), 52~60(1985).
- Clark, R. M. and Boutin, B. K., *Microbiological Removal by filtration Processes*, EPA/600/R-01/110, pp. 8-1~8-16.
- 전향배, 이영주, 신승식, "표면처리된 완속여과 시스템에서 입자 및 자연유기물(NOM)의 제거 특성 연구," 대한환경공학회지, **25**(9), 1132~1137(2003).
- 김성수, 박노석, 김충환, 박종근, "완속여과 공정에서 표층 생물막 생성 및 제어와 원인조류 규명," 상하수도학회지, **22**(3), 289~298(2008).
- 김성수, 배철호, 박노석, 강석형, "완속여과 공정에서 전처리 공정 도입에 따른 입자제거 효율평가," 상하수도학회지, **22**(4), 461~466(2008).
- Rooklidge, S. J., Miner, J. R., Kassim, T. A. and Nelson, P. O., "Antimicrobial contaminant removal by multistage slow sand filtration," *J. AWWA*, **97**(12), 92~100(2005).
- 최윤정, 오현재, 황태문, 남숙현, "한강수계 원수의 2-MIB, geosmin, algae의 발생특성 및 상관성 연구," 한국물환경학회 · 대한상하수도학회 공동 추계학술발표회(2005).
- Suffet, I. H., Mallevialle, J. and Kawczynski, E., *Advances in Taste-and-Order Treatment and Control*, AWWARF, Denver, Colorado(1995).
- Suffet, I. H., Corado, A., Chou, D., McGuire, M. J. and Butterworth, S., "AWWA taste and odor survey," *J. AWWA*, **88**, 168~180(1996).
- Bruce, D., Westerhoff, P. and Brawley-Chesworth, A., "Removal of 2-methylisoborneol and geosmin in surface water treatment plants in Arizona," *J. Water Supply: Research and Technoogy-Aqua*, **51**(4), 183~197(2002).
- Chestnutt, T. E., Bach, M. T. and Mazzyck, D. W., "Improvement of thermal reactivation of activated carbon for the removal of 2-methylisoborneol," *Water Res.*, **41**, 79~86(2007).
- McDowall, B., Hoefel, D., Newcombe, G., Saint, C. P. and Ho, L., "Enhancing the biofiltration of geosmin by seeding sand filter columns with a consortium of geosmin-degrading bacteria," *Water Res.*, **43**, 433~440(2009).
- Meng, A. K. and Suffet, I. H., "A procedure for correlation of chemical and sensory data in drinking water samples by principal component factor analysis," *Environ. Sci. Technol.*, **31**, 337~345(1997).
- Rashash, D. M. C., Dietrich, A. M. and Hoehn, R. C., "FPA of selected odorous compounds," *J. AWWA*, **89**, 131~141(1997).
- 이화자, 손희중, 노재순, 이상원, 지기원, 유평중, 강임석, "오존과 과산화수소를 이용한 이취미 물질 산화 제거," 대한환경공학회지, **28**(12), 1323~1330(2006).
- 이화자, 손희중, 이철우, 배상대, 강임석, "활성탄 재질과 사용연수에 따른 geosmin과 2-MIB 흡착특성," 대한환경공

- 학회지, **29**(4), 404~411(2007).
19. 손동민, 손희중, 이화자, 강임석, “생물활성탄(BAC) 공정을 이용한 이취미물질(geosmin, 2-MIB)의 생분해 특성평가,” 상하수도학회지, **23**(2), 189~198(2009).
 20. 이화자, 강임석, “교반막대추출법(SBSE)과 GC/MS를 이용한 수중의 Geosmin과 2-MIB의 분석,” 대한환경공학회지, **31**(1), 64~69(2009).
 21. 長澤, “粒狀活性炭表層における微生物の動向”, 第41回日本水道研究發表會 發表論文集, 1~3(1990).
 22. APHA, AWWA, WEF, “Heterotrophic plate count,” Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, Eaton, A. D., Clesceri, L. S. and Greenberg, A. E. (Eds), APHA, AWWA, WEF, Washington DC, 19th ED, pp. 9-31~9-35(1995).
 23. Fuhrman, J. A. and Azam, F., “Thymidine incorporation as a measure of heterotrophic bacterio-plankton production in marine surface waters: evaluation and field results,” *Mar. Biol.*, **66**, 109~120(1982).
 24. Parsons, T. R., Maita, Y. and Lalli, C. M., *A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis*, Pergamon, New York(1984).
 25. Bell, R. T., Ahlgren, G. M. and Ahlgren, I., “Estimating bacterioplankton production by the [³H]thymidine incorporation in a eutrophic Swedish Lake,” *Appl. Environ. Microbiol.*, **45**, 1709~1721(1983).
 26. 박노백, 박상민, 서태경, 전향배, “완속여과공정에서 운전 시간 및 여층깊이에 따른 자연유기물질(NOM) 제거 특성,” 상하수도학회지, **22**(4), 467~473(2008).
 27. Ho, L., Hoefel, D., Bock, F., Saint, C. P. and Newcombe, G., “Biodegradation rates of 2-methylisoborneol (MIB) and geosmin through sand filters and in bioreactors,” *Chemosphere*, **66**, 2210~2218(2007).
 28. Hoefel, D., Ho, L., Monis, P. T., Newcombe, G. and Saint, C. P., “Biodegradation of geosmin by a novel Gram-negative bacterium; isolation, phylogenetic characterisation and degradation rate determination,” *Water Res.*, **43**, 2927~2935(2009).
 29. Billen, G., Servais, P., Bouillot, P. and Ventresque, C., “Functioning of biological filters used in drinking water treatment-the Chabrol model,” *J. Water SRT-Aqua*, **4**, 231~241(1992).
 30. Klimenko, N., Winter-Nielsen, M., Smolin, S., Nevynna, L. and Sydorenko, J., “Role of the physico-chemical factors in the purification process of water from surface-active matter by biosorption,” *Water Res.*, **36**(20), 5132~5140(2002).
 31. 손희중, 유수전, 노재순, 유평중, “정수처리에서의 생물활성탄 공정,” 대한환경공학회지, **31**(4), 308~323(2009).