

정수처리용 생물활성탄(BAC) 부착 박테리아를 이용한 회분식 반응기에서의 Geosmin 생분해 특성

Characteristics of Biodegradation of Geosmin using BAC Attached Bacteria in Batch Bioreactor

손희종[†] · 정철우* · 최영익** · 장성호***
Hee-Jong Son[†] · Chul-Woo Jung* · Young-Ik Choi** · Seong-Ho Jang***

부산광역시 상수도사업본부 · *울산산업진흥TP 전략산업기획단 · **동아대학교 환경공학과 · ***부산대학교 지역환경시스템공학과
Busan Water Authority · *Ulsan Regional Innovation Agency, Ulsan Industry Promotion Techno Park
**Department of Environmental Engineering, Dong-A University
***Department of Environment System Engineering, Pusan National University

(2010년 4월 14일 접수, 2010년 7월 20일 채택)

Abstract : In this study, three different biological activated carbons (BACs) were prepared from activated carbons made of each coal (F400, Calgon), coconut (Samchully) and wood(Pica, Picabiol) which were run for two and half years in the pilot plant. The attached bio-film microorganisms in and on the BACs were isolated and identified. The results showed that nine different bacteria species (*Chryseomonas luteola*, *Stenotrophomonas maltophilia*, *Pseudomonas vesicularis*, *Aeromonas hydrophila*, *Spingomonas paucimobilis*, *Agrobacterium radiobacter*, *Pseudomonas fluorescens*, *Spirillum* spp., and *Pasteurella haemolytica*) were isolated and identified, the dominant species was *Pseudomonas* sp. that had occupied 56.5%. More specifically, it was observed that the populations of the microorganisms deceased in the order: *Pasteurella haemolytica* (18.9%) > *Chryseomonas luteola* (4.0%) > *Agrobacterium radiobacter* (3.5%) > *Aeromonas hydrophila* (2.0%) in and on the BACs. After isolating of 9 species of biofilm microorganisms, the growth curve for the biomass was investigated. During 24~96 hours, the biomass has the highest concentration, and activity of the biomass was the best to uptake geosmin as carbon resources. The operation temperatures for investigating the biodegradation of geosmin were set at 4°C and 25°C. *Pseudomonas vesicularis*, *Pseudomonas fluorescens*, *Agrobacterium radiobacter* and *Stenotrophomonas maltophilia* played a maior role in removing the target compound as geosmin. However, geosmin was not biodegraded well by *Chryseomonas luteola*, *Spingomonas paucimobilis*, and *Spirillum* spp.. It is also interesting to evaluate kinetics of biodegradability of geosmin. The first-order rate constants for biodegradability of geosmin at 4°C and 25°C were 0.00006~0.0002 hr⁻¹ and 0.0043~0.0046 hr⁻¹ respectively. Higher water temperature produced better geosmin removal rates. When concentrations of geosmin increased from 10 to 10,000 ng/L, the rate constants for biodegradability of geosmin increased from 0.0003 to 0.0882 hr⁻¹. As described earlier, higher geosmin concentration in the reactor produced higher rate constant.

Key Words : Geosmin, Biological Activated Carbon, Attached Bacteria, Biodegradation, Batch Culture

요약 : 3가지 재질의 생물활성탄 부착 박테리아들을 분리·동정한 결과 총 9종류의 부착 박테리아가 동정되었다. *Pseudomonas*속이 차지하는 비율이 평균 56.5%로 나타나 가장 높은 우점비율을 나타내었고, 다음으로 *Pasteurella*속 18.9%, *Chryseomonas*속 4.0%, *Agrobacterium*속 3.5%, *Aeromonas*속 2.0% 순으로 검출되었다. 순수 분리된 9종의 박테리아들의 성장곡선을 조사한 결과 24~96시간 내에 최대의 생체량을 나타내어 geosmin을 유기탄소원으로 활용하는 능력이 뛰어난 것으로 조사되었다. 4°C와 25°C의 운전조건에서 geosmin에 대한 생분해능을 조사한 결과 *Pseudomonas vesicularis*, *Pseudomonas fluorescens*, *Agrobacterium radiobacter* 및 *Stenotrophomonas maltophilia* 등이 뛰어난 생분해능을 나타낸 반면 *Chryseomonas luteola*, *Spingomonas paucimobilis*, *Spirillum* spp. 등은 비교적 낮은 geosmin 생분해능을 나타내었다. Geosmin의 생분해능은 수온이 4°C일 경우 생분해율 속도상수가 0.00006~0.00020 hr⁻¹의 범위에서 25°C에서는 0.0043~0.0046 hr⁻¹의 범위로 나타나 수온 상승에 따라 큰 폭으로 증가하였으며, 또한, 투입된 geosmin의 농도가 10~10,000 ng/L로 증가할수록 생분해율 속도상수도 0.0003~0.0882 hr⁻¹로 증가하였다.

주제어 : 지오즈민, 생물활성탄, 부착 박테리아, 생물분해, 회분식 배양

1. 서론

수돗물 중에 존재하는 이취물질은 인체에 직접적인 위해성을 나타내지는 않으나 수돗물의 안전성에 대한 불신을 초래하여 미국 등 선진국에서도 정수처리 공정에서 이취물질의 제거에 많은 투자와 관심을 기울이고 있다.^{1,2)} 하천수

나 호소수에는 다양한 이취물질들이 함유되어 있지만 민원 발생빈도와 수돗물 불신에 영향을 미치는 비중으로 보면 geosmin과 2-methylisoborneol (MIB)가 가장 대표적이라 할 수 있다.^{1,2)} Geosmin과 MIB는 *Oscillatoria* sp., *Anabaena* sp. 및 *Phormidium* sp.와 같은 남조류나 방선균에 의해서 생성되는 것으로 알려져 있다.³⁾ 따라서 geosmin과 MIB 같은 이

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

취물질들은 상수원수중에 존재하는 조류 개체수와 밀접한 연관성을 가진다. 또한, 국내 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.⁴⁾

Geosmin과 MIB 같은 이취물질들은 수돗물에서 매우 낮은 농도로 검출된다.⁵⁾ 이들 물질의 역치농도(threshold concentration)는 개인별로 차이는 있으나 6~10 ng/L로 알려져 있어 수돗물에 매우 낮은 농도로 함유되어 있어도 이취를 유발한다.⁶⁾ 이들 물질들은 응집, 침전 및 여과와 같은 재래식 정수처리공정에서는 제거능이 아주 낮은 것으로 보고되고 있다.^{1,7)} 따라서 이들을 제거하기 위해서는 오존을 이용한 산화공정,^{8,9)} 활성탄을 이용한 흡착공정¹⁰⁾ 및 생물활성탄(biological activated carbon, BAC) 공정을 비롯한 생물여과 공정¹¹⁻¹³⁾ 등이 주로 이용된다. Elhadi 등¹⁴⁾과 Meyer 등¹⁵⁾은 pilot 규모의 BAC 공정과 생물여과 공정을 이용하여 geosmin과 MIB 제거실험을 수행한 결과, 다양한 실험조건에서 geosmin과 MIB 제거가 효과적으로 이루어졌다고 보고하였다.

국내에서도 고도정수 공정의 일종으로 BAC 공정을 도입하여 여러 정수장에서 운영하고 있으며, 다양한 재질의 활성탄들이 BAC 공정에서 사용되고 있다. BAC 공정은 파과에 도달한 활성탄 표면과 거대 세공 등에 종속영양성 박테리아들이 부착하여 생물막(biofilm)을 형성하여 활성탄에 흡착된 오염물질들 및 수류의 흐름에 따라 이동하는 오염물질들을 이들 생물막에서 흡수하여 생물분해시켜 제거하는 메카니즘으로 이루어지며,¹⁶⁾ BAC 공정의 제거효율은 생물막의 생체량(biomass)과 활성도(activity), 공탐체류시간(empty bed contact time, EBCT), 수온 및 생분해 가능한 유기물질 농도에 많은 영향을 받는다.^{16,17)} 특히, 생물막을 구성하는 박테리아들은 원수의 성상, 수온의 변화 및 BAC 공정의 운전단계에 따라 구성종(species)들의 변화가 나타나며,^{17,18)} 이들 구성종의 변화에 따른 오염물질 제거효율에 대한 평가는 아직 보고된 바는 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 BAC 공정에서 2년 6개월 정도 사용된 다양한 재질의 활성탄들의 생물막을 구성하는 종속영양 박테리아들을 분류하여 분류된 각 종들에 대해 수온 및 geosmin의 유입농도에 따른 생물분해능을 평가하여 BAC 공정 운전을 위한 기초 자료로 활용하고자 하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. BAC 부착 박테리아 탈리 및 종 동정

BAC는 낙동강 원수를 처리하는 고도 정수처리용 pilot-plant의 BAC 공정에서 2년 6개월간 사용한 석탄계

및 목탄계 재질의 BAC 흡착지의 상부 15 cm 이상의 활성탄을 채취하였다. BAC 내의 박테리아 탈리는 채취된 활성탄을 증류수로 여러 번 세척하여 불순물을 제거하고, 실온 상태에서 3~4시간 정도 건조시킨 후, 활성탄 1 g을 생리식염수(0.85% NaCl/L) 10 mL에 넣고, 3분간 sonication한 후 활성탄을 제거하고, 2 μm polycarbonate 필터(Millipore, USA)로 여과하여 수중에 존재하는 큰 유·무기물 입자 및 원생동물 등을 제거한 후 증류수에 희석하여 박테리아의 동정에 사용하였다. 박테리아의 동정은 형성된 colony의 형태학적 특징을 관찰하여 서로 다른 colony를 R2A 배지에 희석 도말 하여 순수 분리하였다. 순수 분리된 세균은 API 20 NE Kit (bioMerieux, France) 및 생화학적 실험을 실시하고 Bergey's manual의 분류체계에 따라 속 혹은 종명까지 분류 동정하였다.¹⁹⁾

2.2. 회분식 반응기 시료수 조제

시료수는 멸균한 초순수에 고순도 산소(99.999%)를 산기하여 수중의 용존산소 농도를 포화상태로 만든 후 pH를 7 부근으로 조절하여 sigma-aldrich사의 standard급 geosmin을 각각의 실험 조건에 알맞은 농도로 투입하였다. 유기탄소 원으로 사용된 geosmin이 미생물의 대사에 제한인자로 작용되도록 하기 위해서 시료 500 mL에 KH₂PO₄ 8.5 mg/L, K₂HPO₄ 21.75 mg/L, Na₂HPO₄ 33.4 mg/L, FeCl₃ 6H₂O 0.25 mg/L, MgSO₄ 22.5 mg/L, CaCl₂ 27.5 mg/L의 농도가 되도록 멸균된 무기영양염 용액을 주입하여 실험하였다.²⁰⁾

2.3. BAC 종 분리 순수 박테리아 접종

종 분리된 각각의 순수 박테리아들의 접종은 종 분리한 후 1:1 액상배지+글리세롤 용액에 보존된 각각의 순수 박테리아들을 500 mL 회분식 반응기에 시료수를 투입한 후 초기 박테리아 농도가 1~2×10⁴ CFU/mL 정도 되도록 접종하였다.

2.4. 회분식 반응기 운전

회분식 반응기는 pyrex 재질의 멸균된 유리병을 사용하였으며, 종 분리된 각각의 순수 박테리아들이 접종된 시료수를 무균상태에서 각각의 회분식 반응기에 투입하였으며, 회분식 반응기의 운전은 4℃와 25℃의 shaking 배양기에서 150 rpm으로 운전하였으며, 운전시간에 따른 회분식 반응기내의 geosmin 농도와 biomass 농도 변화를 조사하였다.

2.5. Geosmin 분석

Polydimethylsiloxane (PDMS)이 코팅되어 있는 교반막대(Twister™, Gerstel, Germany)에 geosmin을 흡착시켜 수중에서 분리하는 교반막대 흡착추출법(stir bar sorptive extraction: SBSE)을 전처리 방법으로 사용하였으며,²¹⁾ 분석은 GC/MSD로 하였다. Geosmin의 전처리는 시료수 10 mL를 20 mL vial에 취한 후 길이 10 mm, 두께 3.2 mm인 교반막대

Table 1. 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°C, Hold 1.6 min
- 1st rate 20°C to 100°C, 2nd rate 10°C to 140°C, 3rd rate 5°C to 160°C
MSD (5973N, Agilent, U.S.A.)
- SIM mode, Selected ion : 111, 112, 125

(Twister)를 투입하여 1,200 rpm으로 90분 동안 회전시키면서 시료수에 함유된 geosmin을 흡착, 추출한 후 교반막대를 auto sampler가 부착되어 있는 TDS-2 system (Gerstel, Germany)을 이용하여 geosmin을 탈착시켜 GC injector에 설치되어 있는 CIS4 PTV (Gerstel, Germany)에서 액체질소에 의해 -120°C로 응축되어 있다가 일시에 GC/MSD로 주입되어 분석된다. GC/MSD의 분석조건을 Table 1에 나타내었다.

2.6. 박테리아 농도 및 활성도 측정

박테리아 농도는 시료수 1 mL를 R₂A agar (Difco) 평판배지에 단계적으로 희석 도말한 후 25°C 배양기에서 2주간 배양하여 시료수 1 mL당 colony 형성 세균수로 표시하였다.^{22,23)}

박테리아의 활성도는 ³H-thymidine이 DNA에 흡수되는 정도로 구하였다.²⁴⁾ 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 추출냉각시켜 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 등²⁵⁾에 의한 식을 이용하여 incorporation된 thymidine의 양을 계산하였다.²⁶⁾

3. 결과 및 고찰

3.1. BAC 재질별 부착 박테리아 종 분포 및 우점종

BAC 재질별로 부착 박테리아들을 분리·동정한 결과 총 9종류의 부착 박테리아가 동정되었으며, 3가지 재질의 활성탄에서 *Pseudomonas*속이 차지하는 비율이 평균 56.5%로 나타나 우점종으로 나타났으며 그 다음으로 *Pasteurella*속 18.9%, *Chryseomonas*속 4.0%, *Agrobacterium*속 3.5%, *Aeromonas*속 2.0% 순으로 검출되었으며, 10%의 세균은 동정되지 않았다(Table 2). *Pseudomonas*속의 경우 야자계와 석탄계 BAC는 *Pseudomonas vesicularis*, 목탄계 BAC의 경우는 *Pseudomonas fluorescens*가 우점종으로 나타났다. 또한, 석탄계 재질의 BAC에서 8종의 부착 박테리아가 분포하는 것으로 나타나 가장 높은 종 다양성을 나타내었다. 이처럼 BAC 재질별로 부착 박테리아의 우점종과 종 다양성이 다른 이유는 활성탄의 세공 크기, 표면 조직, 유기성 오염물질 흡착능 등의 차이에 의해 세균이 활성탄에 부착할 수 있는 환경 조건이 다르기 때문이다.

3.2. BAC 부착 박테리아 분류 종별 성장곡선

순수 분리된 BAC 부착 박테리아 9종에 대해 25°C에서 유기탄소원을 geosmin으로 하여 배양한 성장곡선을 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이 *Chryseomonas luteola*와 *Stenotrophomonas maltophilia*는 배양 24시간 만에 박테리아 농도가 각각 7.1 × 10⁵ CFU/mL와 7.5 × 10⁵ CFU/mL로 최대를 나타내었고 또한, *Pseudomonas vesicularis*를 비롯한 7종은 배양 96시간 후에 4.0 × 10⁵~7.3 × 10⁵ CFU/mL의 범위로 최대 박테리아 농도를 나타내었다. 분리된 박테리아 9종 모두 Fig. 1에 나타난 성장곡선에서 특이한 점은 나타나지 않았으며, 24~96시간 내에 최대의 biomass 농도를

Table 2. Distribution of attached bacteria in various BAC materials

BAC attached bacteria	BAC material		
	Coal-based	Coconut-based	Wood-based
<i>Chryseomonas luteola</i>	+	+	+
<i>Stenotrophomonas maltophilia</i>	+	-	-
<i>Pseudomonas vesicularis</i>	++	++	-
<i>Aeromonas hydrophila</i>	+	+	-
<i>Spingomonas paucimobilis</i>	-	+	-
<i>Agrobacterium radiobacter</i>	+	+	+
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	+	-	++
<i>Spirillum</i> spp.	+	-	-
<i>Pasteurella haemolytica</i>	+	+	+

"++" is expressed as a dominant species,
 "+" is expressed as a detectable species,
 "-" is expressed as a non-detectable species.

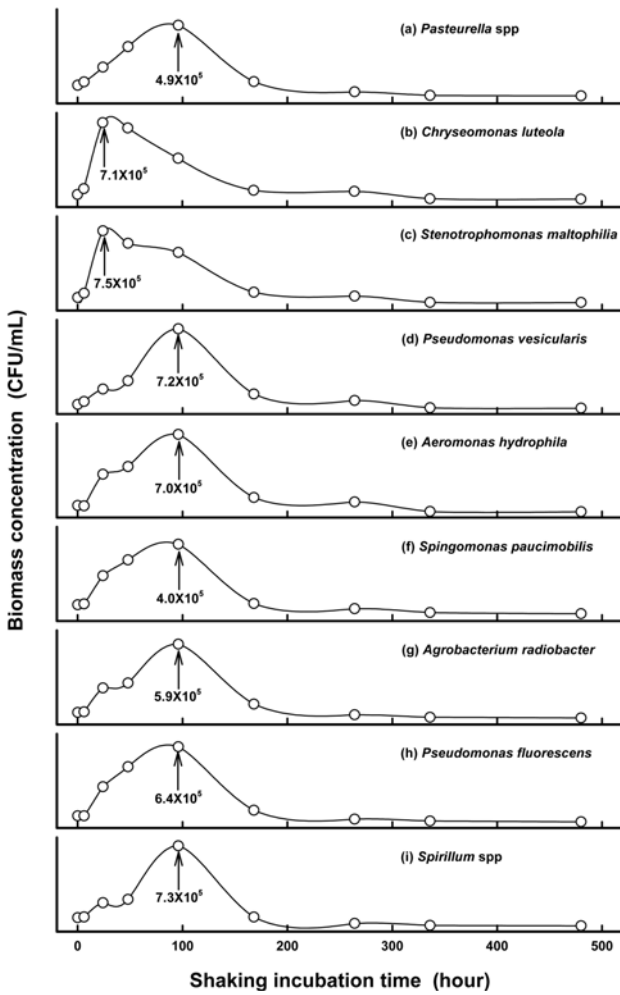


Fig. 1. Growth curves of 9 species BAC attached bacteria (geosmin : 100 ng/L, water temp. : 25°C).

나타내어 geosmin을 유기탄소원으로 활용하는 능력이 뛰어난 것으로 조사되었다. BAC 공정에서 geosmin의 생분해 특성을 조사한 손 등의 연구¹¹⁾에서 BAC 공정에서 geosmin의 생분해능이 아주 높은 것으로 보고하고 있다.

3.3. BAC 부착 박테리아 종별 회분식 반응기에서의 geosmin 생분해 특성

순수 분리된 BAC 부착 박테리아 9종에 대해 회분식 반응기에서 운전시간별 geosmin 생분해 특성을 조사한 것을 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2(a)는 회분식 반응기의 온도가 4°C일 때의 운전시간별 geosmin의 잔존비(residual ratio, C/C₀)를 나타낸 것이다. Fig. 2(a)에서 볼 수 있듯이 9개의 회분식 반응기 운전기간 480시간 동안 4°C의 운전조건에서는 3~10% 정도의 geosmin이 생분해 되어 아주 낮은 생분해율을 나타내어 BAC 공정에서 geosmin의 생분해 특성을 조사한 손 등의 연구결과¹¹⁾와는 매우 큰 차이를 보인다. 손 등¹¹⁾은 BAC의 재질에 따라 수온이 5°C일 때 BAC 공정에서 geosmin의 반감기(t_{1/2})가 9.05~14.29분으로 보고하였다. 이러한 차이는 활성탄에 형성된 생물막(biofilm) 박테리아들

의 개체수와 회분식 반응기 내에 부유하는 박테리아들의 개체수의 차이 및 낮은 수온에서의 생물막 부착 박테리아와 부유 박테리아의 활성도 변화 차이에 의해 유발된 결과로 판단된다. 또한, 4°C의 운전조건에서 *Pseudomonas vesicularis*, *Pseudomonas fluorescens* 및 *Agrobacterium radiobacter* 등은 9~10% 정도의 geosmin 생분해율을 나타낸 반면 *Chryseomonas luteola*, *Spingomonas paucimobilis* 및 *Spirillum spp.*은 3~4% 정도의 geosmin을 생분해시켜 비교적 낮은 geosmin 생분해능을 나타내었다.

Fig. 2(b)에는 회분식 반응기의 운전 온도를 25°C로 하여 운전하였을 경우의 운전시간별 geosmin의 잔존비를 나타내었다. 전체적으로 운전시간의 경과에 따라 geosmin의 생분해율이 증가하는 것으로 나타나고 있으며, 운전 초기에는 *Pseudomonas vesicularis*와 *Stenotrophomonas maltophilia*가 geosmin에 대해 빠른 생분해 특성을 보이고 있으며, 운

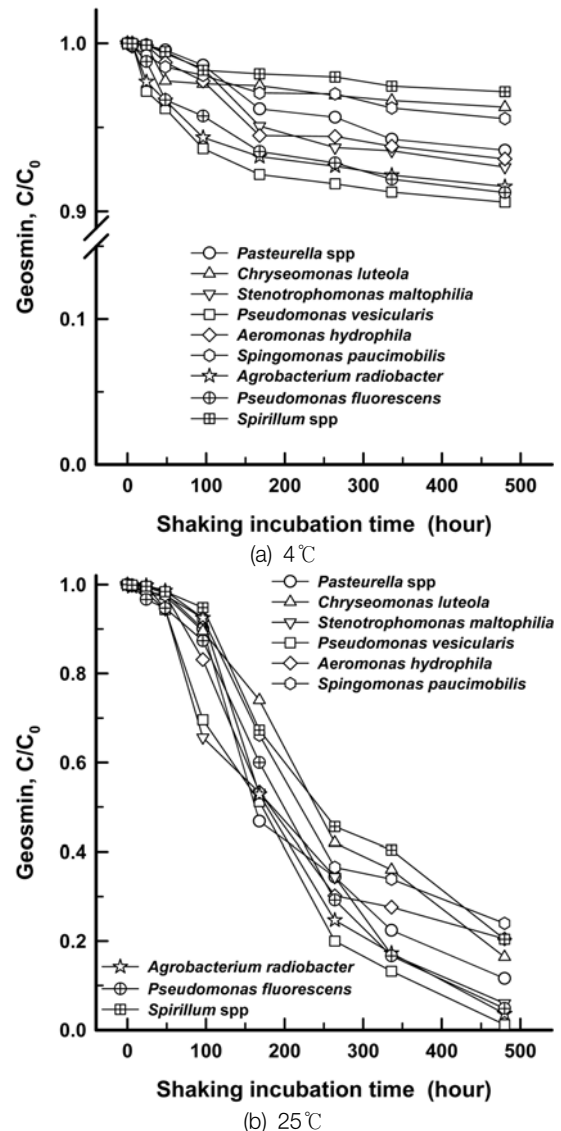


Fig. 2. Geosmin removals according to various water temperature in the coal-based BAC filter (geosmin : 100 ng/L).

Table 3. Activity of BAC attached bacteria

Item	<i>Pseudomonas vesicularis</i>	<i>Pseudomonas fluorescens</i>	<i>Pasteurella haemolytica</i>	<i>Chryseomonas luteola</i>
Activity (mgC/m ³ · hr)	2.97	2.82	2.61	2.48

전 300시간 이후에는 *Pseudomonas vesicularis*, *Agrobacterium radiobacter*, *Pseudomonas fluorescens* 및 *Stenotrophomonas maltophilia*가 geosmin에 대해 높은 생분해율을 나타내었다. 또한, *Chryseomonas luteola*, *Spingomonas paucimobilis* 및 *Spirillum spp.*는 회분식 반응기의 운전온도가 4℃일 때와 마찬가지로 25℃일 때도 geosmin의 생분해율이 9종들 중 가장 낮은 것으로 조사되었다. 특히, *Chryseomonas luteola*는 Fig. 1(b)에 나타난 성장곡선에서 배양 초기에 매우 빨리 증식하는 것으로 나타났지만 geosmin의 생분해능은 9종들 중에서 매우 낮게 나타났다.

순수 분리된 BAC 부착 박테리아 9종 중 3가지 재질의 BAC에서 비교적 높은 검출비율을 나타낸 4종에 대해 배양 초기에 박테리아들의 활성도를 측정된 값을 Table 3에 나타내었다. BAC에서 우점비율이 높은 *Pseudomonas*속 2종의 활성도가 *Pseudomonas vesicularis* 2.97 mgC/m³ · hr과 *Pseudomonas fluorescens* 2.82 mgC/m³ · hr로 나타났고, 우점종은 아니지만 3가지 재질의 BAC에 모두 분포하는 *Pasteurella haemolytica*와 *Chryseomonas luteola*의 경우는 활성도가 각각 2.61 mgC/m³ · hr과 2.48 mgC/m³ · hr로 나타났다. Fig. 2에 나타난 회분식 반응기에서의 배양시간에 따른 geosmin의 생분해능을 평가한 결과와 비교해 보면 *Pseudomonas*속 2종의 생분해능이 가장 우수한 것으로 나타났으며, *Pasteurella haemolytica*는 9종 중 중간 정도의 생분해능을 나타내었고, *Chryseomonas luteola*의 경우는 매우 낮은 생분해능을 나타내어 Table 3에 나타난 활성도 결과와 매우 유사한 결과를 보였다. 가장 높은 생분해능을 나타낸 *Pseudomonas vesicularis*의 경우는 *Pseudomonas fluorescens*, *Pasteurella haemolytica* 및 *Chryseomonas luteola*와 비교하여 5~16% 정도 높은 활성도를 나타내었다.

3.3. Geosmin의 생물분해 동역학 평가

종속영양성 박테리아를 이용한 회분식 반응기에서 halo-acetic acid류의 생분해능을 평가한 McRae 등의 연구²⁷⁾에 의하면 ln(C/C₀)와 반응시간이 직선식으로 나타날 경우 pseudo-first order rate로 표현 가능하다고 보고하였다. 따라서 Fig. 3에서 도출된 회분식 반응기를 이용한 순수 분리된 BAC 부착 박테리아 9종들의 4℃와 25℃의 수온에서 배양 시간 경과에 따른 geosmin의 생물분해율을 이용하여 각각의 조건에서의 생분해율 속도상수(biodegradation rate constant, k)를 식 (1)로 구하였다.

$$C/C_0 = \exp(-k \cdot t) \tag{1}$$

여기서 절편값은 C(반응시간 후 농도)와 C₀(초기농도)가 같을 때(C=C₀)의 값이므로 1이며, k는 생분해율 속도상수, t

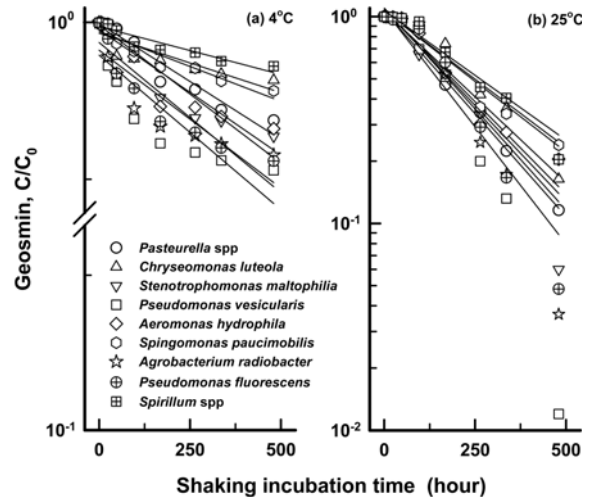


Fig. 3. Pseudo-first-order reaction plot of geosmin for various water temperature at 4, 25℃ in batch bioreactor.

는 배양시간(incubation time, hr)이다. 식 (1)을 이용하여 여러 실험조건에서 도출된 결과를 회귀분석하여 생분해율 속도상수 k를 구하였다. 또한, geosmin의 50% 제거시점인 반감기(half-life, t_{1/2})를 식 (2)로 구하였으며, Table 4에 회분식 반응기를 이용한 순수 분리된 BAC 부착 박테리아 9종들의 4℃와 25℃의 수온에서 배양시간 경과에 따른 geosmin의 생분해율 속도상수(k)와 반감기(t_{1/2})를 나타내었다.

$$t_{1/2} = 0.693/k \tag{2}$$

순수 분리된 BAC 부착 박테리아 9종들이 각각 접종된 회분식 반응기의 수온이 4℃일 경우 생분해율 속도상수(k)값은 0.00006~0.0002 hr⁻¹의 범위로 나타났으며, 회분식 반응기에서의 반감기(t_{1/2})의 경우는 11,550~3,465 hr로 나타나 가장 낮은 생분해율 속도상수를 나타낸 *Spirillum spp.*와 가장 높은 생분해율 속도상수를 나타낸 *Pseudomonas vesicularis* 등과의 차이는 3.3배 정도로 나타났다. 또한, 회분식 반응기의 수온이 25℃일 경우의 생분해율 속도상수(k)값과 반감기(t_{1/2})의 경우는 *Pseudomonas vesicularis*가 0.0052 hr⁻¹ 및 133 hr로 geosmin에 대해 가장 빠른 생분해능을 나타내었고, 다음으로 *Stenotrophomonas maltophilia*, *Agrobacterium radiobacter*, *Pseudomonas fluorescens* 순이었으며, 생분해율 속도상수(k)값과 반감기(t_{1/2})는 0.0043~0.0046 hr⁻¹ 및 151~161 hr의 범위로 나타났다. *Spirillum spp.*의 경우 4℃의 경우와 마찬가지로 가장 낮은 생분해율 속도상수(k)값과 반감기(t_{1/2})를 나타내었으며, 각각 0.0029 hr⁻¹ 및 239 hr로 나타났다. 25℃의 회분식 반응기에서 geosmin에 대해 가장 빠른 생분해율 속도상수(k)값을 나타낸 *Pseudomonas vesicularis*의 경우 *Spirillum spp.* 보다 1.8배 정도 빠른 geo-

4. 김영웅, 손희중, 유명호, 이춘식, 조인철, 김은호, 성낙창, “정수처리과정 중 침전지 부착조류 특성과 이취발생에 관한 연구,” *대한환경공학회지*, **22**(5), 887~894(2000).
5. Suffet, I. H., Corado, A., Chou, D., McGuire, M. J. and Butterworth, S., “AWWA taste and odor survey,” *J. AWWA.*, **88**, 168~180(1996).
6. Rashash, D. M. C., Dietrich, A. M. and Hoehn, R. C., “FPA of selected odorous compounds,” *J. AWWA.*, **89**, 131~141 (1997).
7. Lalezary, S., Pirbazari, M. and McGuire, M. J., “Evaluating activated carbons for removing low concentrations of taste-producing and odor-producing organics,” *J. AWWA.*, **78**(11), 76~82(1986).
8. 이화자, 손희중, 노재순, 이상원, 지기원, 유평중, 강임석, “오존과 과산화수소를 이용한 이취미 물질 산화 제거,” *대한환경공학회지*, **28**(12), 1323~1330(2006).
9. Ferguson, D. W., McGuire, M. J., Koch, B., Wolfe, R. L. and Aieta, E. M., “Comparing peroxone and ozone for controlling taste and odor compounds, disinfection by-products, and microorganisms,” *J. AWWA.*, **82**(4), 181~191(1990).
10. 이화자, 손희중, 이철우, 배상대, 강임석, “활성탄 재질과 사용연수에 따른 geosmin과 MIB 흡착특성,” *대한환경공학회지*, **29**(4), 404~411(2007).
11. 손동민, 강임석, 손희중, 이화자, “생물활성탄(BAC) 공정을 이용한 이취미물질(geosmin, 2-MIB)의 생분해 특성평가,” *대한상하수도학회지*, **23**(2), 189~198(2009).
12. Namkung, E. and Rittmann, B. E., “Removal of taste and odour-causing compounds by biofilms grown on humic substances,” *J. AWWA.*, **79**(7), 107(1987).
13. 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).
14. Elhadi, S. L. N., Huck, P. M. and Slawson, R. M., “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(2004).
15. Meyer, K. J., Summers, R. S., Westerhoff, P. and Metz, D., “Biofiltration for geosmin and MIB removal,” *Proceedings of 2005 AWWA Annual Conference*, June 12~16, San Francisco, California(2005).
16. 손희중, 유수진, 노재순, 유평중, “정수처리에서의 생물활성탄 공정,” *대한환경공학회지*, **31**(4), 308~323(2009).
17. 손희중, 박흥기, 이수애, 정은영, 정철우, “생물활성탄 공정에서 활성탄 재질에 따른 부착미생물 군집특성,” *대한환경공학회지*, **27**(12), 1311~1320(2005).
18. Långmark, J., Storey, M. V., Ashbolt, N. J. and Stenström, T. A., “Artificial groundwater treatment: biofilm activity and organic carbon removal performance,” *Water Res.*, **38**, 740~748(2004).
19. Krieg, N. R. and Holt, J. G., *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology*. Williams & Wilins. Baltimore(1984).
20. Goel, S., Hozalski, R. M. and Bouwer, E. J., “Biodegradation of NOM: effect of NOM source and ozone dose,” *J. AWWA.*, **87**(1), 90~105(1995).
21. Benanou, D., Acobas, F., Roubin, M. R., David, F. and Sandra, P., “Analysis of off-flavors in the aquatic environment by stir bar sorptive extraction-thermal desorption-capillary GC/MS olfactometry,” *Anal. Bioanal. Chem.*, **376**, 69~77(2003).
22. 長澤, “粒狀活性炭表層における微生物の動向,” 第41回日本水道研究発表會 發表論文集, 1~3(1990).
23. 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).
24. 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).
25. Parsons, T. R., Maita, Y. and Lalli, C. M., *A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis*, Pergamon, New York(1984).
26. 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).
27. McRae, B. M., LaPara, T. M., and Hozalski, R. M., “Biodegradation of haloacetic acids by bacterial enrichment cultures,” *Chemosphere*, **55**, 915~925(2004).