

상향식 바이오필터에서 상·하층의 메탄 산화 특성 비교

윤정희, 김정미, 김지은, 이다슬, 조경숙*
이화여자대학교 환경공학과

Received : January 9, 2013 / Revised : February 9, 2013 / Accepted : April 4, 2013

Comparison of Methanotrophic Activity at Top and Bottom Layers in Up-flow Biofilters. Yun, Jeonghee, Jung Mi Kim, Ji Eun Kim, Daseul Lee, and Kyung-Suk Cho*. *Department of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University, Seoul 120-750, Korea*

The methane oxidation characteristics at the top and bottom layers in up-flow biofilters were investigated. Two biofilters were packed with perlite and tobermolite (biofilter A: respectively top and bottom; biofilter B: respectively bottom and top) and then compared. The methane oxidation rate was analyzed with the packed bed of the biofilter layers. The bacterial population in the biofilter was characterized using quantitative real-time PCR. For the methane oxidation rate of the biofilter A column, the perlite top part ($845.16 \pm 64.78 \mu\text{mol}\cdot\text{VS}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) gave a relatively higher value than the tobermolite bottom part ($381.85 \pm 42.00 \mu\text{mol}\cdot\text{VS}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$). For the methane oxidation rate of the biofilter B column, the tobermolite top part ($601.25 \pm 37.78 \mu\text{mol}\cdot\text{VS}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) provided a relatively higher value than the perlite bottom part ($411.07 \pm 53.02 \mu\text{mol}\cdot\text{VS}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$). The *pmoA* gene copy numbers, responsible for methanotrophs, in the top layer of biofilter A ($1.27\text{E}+13$ *pmoA* gene copy number/mg-VSS) was higher than in the bottom layer ($3.33\text{E}+13$ *pmoA* gene copy number/mg-VSS). However, the population of methanotrophs in biofilter B was not significantly different between the top and bottom layers. These results suggest that although the methane oxidation rates of perlite and tobermolite in the top parts of biofilter A and B were high, methanotroph populations were higher in the bottom parts of both biofilters, with a rapid decline in methane concentrations within the biofilters.

Keywords: Methane, up-flow biofilter, methanotrophs, perlite, tobermolite

서 론

온실효과를 일으키는 온실가스는 이산화탄소(CO₂)와 non-CO₂ 온실가스(메탄, 아산화질소, 과불화탄소, 수불화탄소, 육불화황로 구분된다[7]. 메탄은 대표적인 non-CO₂ 온실가스 중의 하나로, 메탄의 온실효과 잠재성(global warming potential, GWP)은 이산화탄소의 23-25배 이상이다[7, 14]. 고농도로 배출되는 메탄은 에너지 자원으로 회수하지만, 저농도 메탄은 메탄을 분해하는 미생물을 이용하여 저장시키는 것이 적합하다[8, 16]. 최근 들어 호기적 조건하에서 메탄 산화세균의 활성을 활용하여 다양한 물질을 충전재로 사용한 바이오필터를 이용하여 메탄을 저장하고자 하는 연구들이 활발하게 이루어지고 있다[2, 10, 17, 21].

바이오필터의 처리효율은 충전물질에 따라 매우 큰 영향

을 받기 때문에, 충전물질은 목적으로 하는 가스를 분해할 수 있는 충분한 양의 미생물이 존재할 수 있도록 하는 필요 조건들을 만족해야 한다[15]. 그 밖에도 충전재는 구조, 공극율, 표면적, 흡수성을 비롯한 경제성 등의 비용적 측면까지 화학, 물리, 생물학적 특성 등 다양한 조건에서 고려되어야 한다[4, 15]. 바이오필터 담체 중 perlite는 pH 7.9 정도의 약 알칼리성을 띠고 있으며 밀도는 0.70 g/cm^3 으로 큰 편이고 porosity가 63.4%로 높아 담체로서 사용하기 적합하다. Perlite를 바이오필터의 혼합충전재(sand-compost-perlite)로 사용한 결과, 유입메탄량($134 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-2}\text{d}^{-1}$)이 100% 제거되었고 유기담체 compost만을 사용했을 때보다 압밀효과가 낮았다[18]. Kim 등[12]은 perlite와 입상활성탄을 혼합하여 충전한 메탄저감용 바이오필터에 20,000 ppmv 농도의 메탄 유입시 90%의 메탄제거 효율을 나타내었다고 보고하였다. 하지만, 여전히 보다 효율적인 바이오필터 시스템 개발에 있어, 경쟁력 강화를 위한 경제성이 우수한 담체 선발에 대한 요구가 증가하고 있다. 이러한 점에서, 다공성 건축자재로써 미생물 생육 조건에 적합함은 물론 경제성을 가지는

*Corresponding author

Tel: +82-2-3277-2393, Fax: +82-2-3277-3275

E-mail: kscho@ewha.ac.kr

© 2013, The Korean Society for Microbiology and Biotechnology

tobermolite를 새로운 담체로 활용 가능성에 대해 검토할 필요성이 있다. 기존의 많은 연구가 유기재료와 무기재료의 혼합담체를 중심으로 이루어져 왔던 반면 무기성 물질들을 혼합하여 적용하는 경우에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았으며 또한 최대 효율을 도출하기 위한 적정 혼합조건에 대한 연구가 이루어져야 할 필요가 있다.

본 연구진은 다공성 건축자재인 tobermolite를 메탄저감용 바이오필터 담체로 이용하여 성능을 평가한 결과 perlite와 유사한 메탄 제거 성능을 얻을 수 있었다. 메탄산화세균의 활성은 바이오필터의 메탄 제거 성능에 주요 역할을 한다 [13, 15]. 따라서 바이오필터를 최적의 운전상태를 유지하기 위해서는 바이오필터 층별 메탄산화특성을 분석할 필요가 있다. Gebert 등[5]은 각기 다른 무기물로 구성된 5개 층으로 구분되는 mesocosm biofilter에서 층별 메탄산화세균을 분석한 결과, 상대적으로 산소공급이 원활한 상층부에서 메탄산화세균이 최하단부에 비하여 10배 이상 많이 존재한다고 보고하였다. 또한 Wilshusen 등[22]은 4종류의 compost들을 담체로 하여 180일 이상의 장기운전한 바이오필터에서 높이별 메탄농도와 메탄산화세균수를 측정하고, woodchip compost가 다른 담체에 비하여 월등히 많은 수의 메탄산화세균이 존재하였음에도 불구하고 최대 제거속도가 매우 낮았다고 보고하였다.

상향식 바이오필터에서는 처리 대상 메탄이 유입되는 하층은 메탄 농도가 높고 상층으로 갈수록 메탄 농도가 낮아지므로, 상하층간의 가스 농도 차이가 생기며 이에 따라 상하층간 미생물 군집과 메탄 분해 활성이 영향을 받을 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 perlite와 tobermolite 담체를 각각 상·하단(바이오필터 A) 또는 하·상단(바이오필터 B)으로 충전한 상향식 바이오필터에서 상하단의 메탄산화 특성을 비교하였다. 각 바이오필터에서 상단과 하단 담체를 채취하여 메탄산화속도를 측정하고, 정량적 real time PCR 방법을 이용하여 메탄산화세균수를 정량분석 하였다.

재료 및 방법

담체 및 접종원

본 연구에서 사용한 담체는 perlite (orchid stone, 난석)와 tobermolite (Autoclaved Aerated Concrete, 건축자재)이다. Perlite의 수분보유능력은 64.6%, pH 6.0, 용적밀도 0.470 g/cm³, 기공률 70.4%, 표면적이 32.1 m²/g이었다. Tobermolite의 수분보유능력은 109.5%, pH 7.0, 용적밀도 0.276 g/cm³, 기공률 72.1%, 표면적이 119.1 m²/g이었다.

Perlite와 tobermolite를 분진이 날리지 않을 때까지 세척하고 통풍 건조하였다. 건조시킨 담체 perlite는 2,980 g 또는 tobermolite는 2,540 g에 매립지토양으로부터 얻은 혼합

메탄산화세균 배양액 2 L를 넣어 메탄산화세균을 담체에 고정시켰다.

바이오필터 운전 및 담체 채취

메탄 저감용 바이오필터는 아크릴로 제작한 바이오필터 (지름 80 mm, 높이 1000 mm) [11]에 perlite와 tobermolite 담체를 다음과 같이 충전하였다. Biofilter A는 상단에 perlite, 하단에 tobermolite를, Biofilter B는 상단에 tobermolite, 하단에 perlite를 각각 500 mm 높이가 되도록 충전하였다. 운전하는 동안 바이오필터의 담체가 건조되는 것을 방지하고 미생물에 무기염을 공급하기 위하여 drain 저장조에 NMS (MgSO₄·7H₂O 1 g/L, CaCl₂·2H₂O 0.295 g/L, KNO₃ 1 g/L, KH₂PO₄ 0.26 g/L, Na₂HPO₄·12H₂O 0.825 g/L, CuSO₄·5H₂O 0.749 g/L) 배지를 첨가하여 넣었다. 이 용액을 순환 펌프를 이용하여 바이오필터에 1일 6시간 간격으로 4회 1분간 분사해주었다. Drain 저장조(4 L)의 무기염배지는 일주일에 한번씩 교환해 주었다. 주입구의 메탄가스 농도는 99.9% 메탄가스를 8 ml/min 유입속도로 air 250 ml/min과 혼합하여 humidifier (4.1 L)를 거쳐 바이오필터의 하단으로 50,000 ppmv 농도로 주입하였다. 이 때 유입속도에 따른 바이오필터 내 체류시간은 20분으로 하였다. 운전개시 56일 후부터 59일 사이에는 주입 메탄가스량을 25,000 ppmv로 일정하게 주입하였다. 바이오필터는 실온(26 ± 3°C)에서 59일 동안 운전하였다.

바이오필터의 주입구와 배출구에서의 메탄가스 농도는 0.5 ml gas tight syringe를 이용하여 가스를 0.3 ml씩 채취하여 분석하였다.

바이오필터의 깊이별 메탄산화속도를 비교하기 위하여 누적기간 56일부터 59일 사이에는 주입구로부터 배출구까지 15 cm 간격의 6개 지점(하단 주입구로부터 15, 30, 45, 60, 75, 90 cm 높이)에서 높이에 따른 메탄가스 농도 측정하였다.

Perlite와 tobermolite 담체를 각각 상하 혹은 서로 반대로 충전한 biofilter A와 B의 운전기간에 따른 메탄가스 제거효율은 메탄 유입농도 50,000 ppmv에서 biofilter A와 B가 각각 평균적으로 49.3%와 43.3%로 나타났다. 운전시간 55일 경과시점 이후 25,000 ppmv 농도로 메탄을 주입후에는 biofilter A와 B의 평균 메탄 제거 효율이 각각 70%, 55%로 나타났다.

바이오필터 운전시간 59일 경과시점에 바이오필터 상단(90 cm 높이)과 하단(15 cm 높이)에서 시약스폰으로 균일하게 담체를 채취하여 50 ml를 획득하여 메탄분해속도 측정 및 미생물 정량분석 실험에 사용하였다. 채취한 담체의 TS (Total solids)와 VS (Volatile solids)는 담체 5 g(습중량)을 취하여 도가니에 담은 뒤 110°C와 550°C에서 건조 후 중량차를 측정하여 사용하였다.

메탄분해속도 측정

각 담체별 메탄산화속도 비교를 위하여 채취한 시료 10.0 g (습중량)을 NaCl solution (0.9%) 20 ml에 넣어 잘 섞어준 후, Sonicator (Q500, Qsonica, LLC., USA)으로 10 W, 5분간 초음파처리를 수행하여 생물량을 탈착하였다. 탈착된 생물량이 포함되어 있는 현탁액을 NMS 배지를 첨가하여 perlite는 약 435 mg-VS/L, tobermolite는 약 277 mg-VS/L가 되도록 만들어 준비하였다. 120 ml 혈청병에 각 현탁액을 4 ml씩 분주하였고, 대조군은 생물량이 포함되지 않은 NMS 배지 4 ml를 분주하여 사용하였다. 혈청병을 부틸고무마개로 밀봉한 뒤, 메탄을 최종 농도가 5%(v/v)가 되게 주입한 후 이를 30°C, 180 rpm 조건에서 진탕배양하였다. 시간에 따른 메탄 잔류농도는 혈청병 상부 headspace 가스를 gas tight syringe로 0.3 ml 채취하여 불꽃 이온화 검출기(FID)가 장착된 가스 크로마토그래피(Agilent 6850N, Santa Clara, USA)를 이용하여 분석하였다. 분석조건은 Supelco-wax column (30 m×0.32 mm×0.25 µm, Supelco Inc., Bellefonte, USA), carrier gas (H₂ 40 ml min⁻¹, air 350 ml min⁻¹, make-up gas (N₂ 30 ml min⁻¹), split ratio 50:1, injector temperature 230°C, detector temperature 230°C, oven temperature 100°C에서 수행하였다.

일반세균수와 메탄세균수 정량분석

바이오필터의 담체 층적배열에 따른 일반세균 및 메탄산화세균의 정량 분석하기 위하여 biofilter A와 B로부터 균일하게 채취한 담체를 사용하였다. 각 부분에서 채취한 담체 10.0 g(습중량)을 NaCl solution (0.9%) 20 ml에 넣어 잘 섞어준 후, Sonicator (Q500, Qsonica, LLC., USA)으로 10 W, 5분간 초음파처리를 수행하였다. Biofilter A-perlite, Biofilter A-tobermolite, Biofilter B-perlite, Biofilter B-tobermolite 시료의 각 상등액을 7 ml씩 취하여 MLSS (Mixed Liquor Suspended Solids), MLVSS (Mixed Liquor Volatile Suspended Solids) 측정을 수행하였다.

각 바이오필터의 상·하단으로부터 채취된 시료 초음파처리를 통해 탈착된 생물량이 포함되어 있는 현탁액 1 mL를 원심분리(13,200 rpm, 10분)하여 부유액 제거 후 DNA 추출 시료로 사용하였다. DNA는 NucleoSpin® Soil kit (Macherey-Nagel GmbH Co., Duren, Germany)을 이용하여 추출 정제하였고, 추출방법은 매뉴얼에 따라 수행하였다. 모든 genomic DNA는 3번복으로 추출되었다. 바이오필터의 상·하단에 배열을 달리한 각 담체에 존재하는 총 세균과 메탄산화세균을 quantitative real time PCR (qRT-PCR) 방법으로 정량 분석하기 위해 추출된 genomic DNA를 qRT-PCR 반응의 시료로 사용하였다. 총 세균을 증폭하는데 사용한 primer set는 340f(5'-TCC TAC GGG AGG CAG CAG-3') [11]와 805r(5'-

GAC TAC HVG GGT ATC TAA TCC-3') [11]이고, 메탄산화세균을 증폭하는데 사용한 primer set는 A189f(5'-GGN GAC TGG GAC TTC TGG-3') [19]와 mb661r(5'-CCG GMG CAA CGT CYT TAC C-3') [19]이었다. Gene copy number와 C_t (Threshold cycle)의 상관관계를 알아보고자 standard 시료 농도범위를 10⁴-10⁹ gene copy number/2 µl 까지 하였고, 시료에 대하여 2반복으로 qRT-PCR을 수행하였다. PCR mixture 조성은 16S rDNA의 경우 template 2 µl, ddWater 15.875 µl, 10× PCR buffer (Genenmed Inc., Korea) 2.5 µl, 2.5 mM dNTPs (Genenmed Inc., Korea) 2 µl, 50× SYBR (invitrogen™, USA) 0.5 µl, 50× ROX dye(invitrogen™, USA) 0.5 µl, Taq polymerase (Genenmed Inc., Korea) 0.125 µl, 10 µM primer 340f 0.5 µl, 805r 1.0 µl이다. PCR 조건은 95°C에서 3분, 95°C에서 15초, 50°C에서 30초, 72°C 30초를 35 cycles 반복하였고 마지막에 82°C에서 30초간 유지시켰다. 데이터 수집은 82°C에서 이루어졌다. *pmoA*의 경우 template 2 µl, ddWater 16.375 µl, 10× PCR buffer (Genenmed Inc., Korea) 2.5 µl, 2.5 mM dNTPs (Genenmed Inc., Korea) 2 µl, 50× SYBR (invitrogen™, USA) 0.5 µl, 50× ROX dye (invitrogen™, USA) 0.5 µl, Taq polymerase (Genenmed Inc., Korea) 0.125 µl, 10 µM primer A189f 0.5 µl, mb661r 0.5 µl이고, PCR 조건은 95°C에서 3분, 95°C에서 15초, 55°C에서 30초, 72°C 30초를 35 cycles 반복하였고 마지막에 82°C에서 30초간 유지시켰다. 데이터 수집은 82°C에서 이루어졌다. 작성된 검량선으로부터 각 시료의 총 세균 및 메탄산화세균의 gene copy number를 계산하였다.

결과 및 고찰

바이오필터 높이별메탄 제거 특성 비교

바이오필터의 층별로 메탄가스의 농도를 측정하여 메탄이 제거되는 특성을 조사하였다(Fig. 1). 두 바이오필터 모두 하단입구로부터 주입된 메탄이 biofilter A 15-30 cm 구간과 biofilter B 30-45 cm 구간에서 최대 메탄 농도 감소가 이루어진 것이 확인되었다. 하단층 전구간에서의 메탄 감소량은 biofilter B가 biofilter A보다 높은 것으로 나타났다($p < 0.005$). 이종의 담체사이 경계부분(45-60 cm 구간)에서 메탄 제거량이 급격히 감소(biofilter A: 1,827 ppm 감소, biofilter B: 438 ppm 감소)하는 것이 관찰되었고, p -value가 각각 0.007과 0.002로 나타나 담체변화에 따른 메탄 제거량 차이가 유의함을 보였다. 상단의 경우, 60-75 cm 구간에서 biofilter A는 2,892 ppm, biofilter B는 2,499 ppm의 메탄 농도 최대 감소치를 나타내었으나, biofilter A 상단에서는 담체내 층별 메탄 제거량에 따른 차이는 유의하지 않은 것

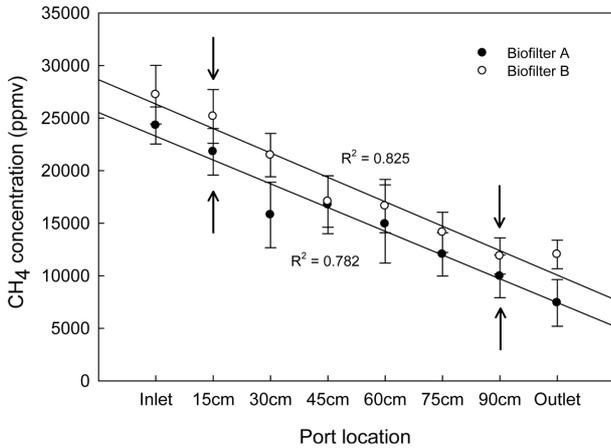


Fig. 1. Layer profile of methane concentration in up-flow biofilters (Arrow: sampling site).

로 나타났다($p > 0.05$). 이는 이중의 혼합담체를 사용하여 층적배열을 다르게 한 바이오필터의 메탄 제거 특성이 담체간의 층적배열 순서에 의한 영향보다는 담체의 충전위치에 따른 영향력이 크다는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 메탄이 바이오필터 하층부에서 제거되는 것은 메탄 분해에 영향을 미치는 가장 중요한 무생물적 인자인 산소 이용성 때문이었을 가능성이 있다. 메탄가스가 공기와 함께 하단에서부터 유입되어 상단부로 확산하게 되는데, 공급된 산소를 메탄 산화 세균이 이용하여 하단부에서 선점적으로 많은 양의 메탄을 산화할 수 있었기 때문에 판단된다. Ryu와 Cho [19]는 메탄을 포함한 혼합가스 제거용 바이오커버에서 깊이별 메탄제거 특성을 조사한 결과, 산소이용도가 높았던 상단층 0-30 cm에서 메탄분해가 이루어졌으며 하단층에서는 거의 제거되지 않았다고 보고하였다.

혼합담체의 층적배열 차이에 따른 각 담체의 순수 메탄 산화능을 조사하기 위하여, 운전종료 이후 각 바이오필터 상·하단의 담체로부터 생물량을 탈착하여 실험을 수행하였다 (Fig. 2). 바이오필터 A와 B의 메탄산화속도는 biofilter A-perlite는 $845.16 \pm 64.78 \mu\text{mol} \cdot \text{VS}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 이었고 biofilter B-tobermolyte는 $601.25 \pm 37.78 \mu\text{mol} \cdot \text{VS}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 으로 유의차 ($p < 0.005$)가 있는 것으로 나타났으며 바이오필터에서의 메탄제거효율과는 상이한 경향을 보였다. 이는 두 바이오필터 모두 상단에 위치한 담체들의 메탄산화능이 하단부(biofilter A-tobermolyte: $381.85 \pm 42.00 \mu\text{mol} \cdot \text{VS}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ biofilter B-perlite: $411.07 \pm 53.02 \mu\text{mol} \cdot \text{VS}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)에 비하여 상대적으로 높은 것으로 나타났($p < 0.005$). 이는 perlite가 tobermolyte보다 더 나은 메탄 산화속도를 갖는다고 하더라도 혼합담체로써 적용시 하단부에 충전시키는 경우 메탄 산화능이 감소될 수 있음을 시사한다.

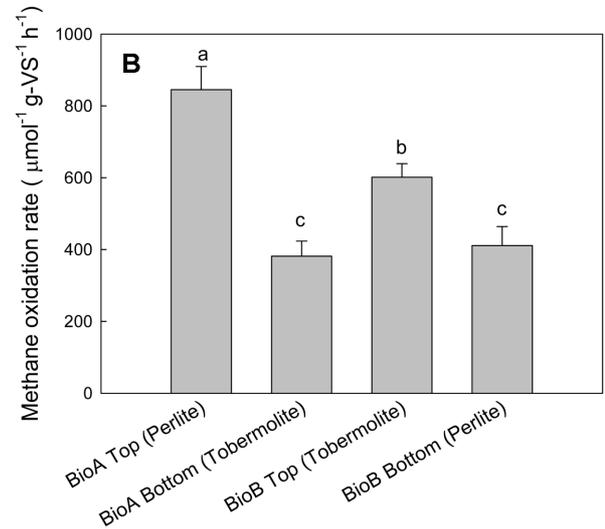
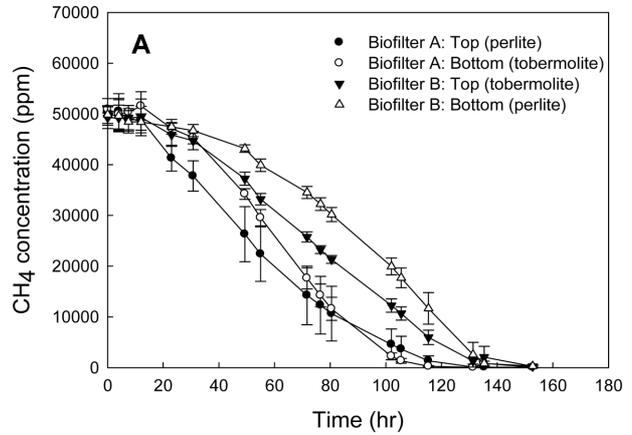


Fig. 2. Comparison of specific methane oxidation rates.

(A) Time course at each biofilter bed, (B) Specific methane oxidation rate based on g-VS of each biofilter bed.

일반세균수와 메탄세균수 비교

각각의 바이오필터로부터 담체를 회수하여 일반세균과 메탄 산화 미생물의 생물량을 정량분석한 결과(Fig. 3), 바이오필터 A는 상대적으로 하단에서 많은 메탄 산화 세균이 존재하는 것으로 조사되었고(biofilter A perlite 상단: $1.27\text{E}+13 \text{ pmoA gene copy number/mg-VSS}$; biofilter A tobermolyte 하단 $3.33\text{E}+13 \text{ pmoA gene copy number/mg-VSS}$), 이는 95% 신뢰수준에서 유의차가 있는 것으로 나타났($p < 0.05$). 바이오필터 B는 바이오필터 A보다 메탄 산화 세균이 적게 존재하는 것으로 나타났으며($p < .05$, 바이오필터 B의 상단과 하단간의 메탄 산화 세균수의 차이는 유의하지 않은 것으로 나타났($p > 0.05$)). 일반세균은 바이오필터 A와 B간은 물론 각 바이오필터의 상·하단간에도 유의한 수준의 차이를 보이지 않았($p > 0.05$). Czepiel 등[3]의 연구에서 3%(부

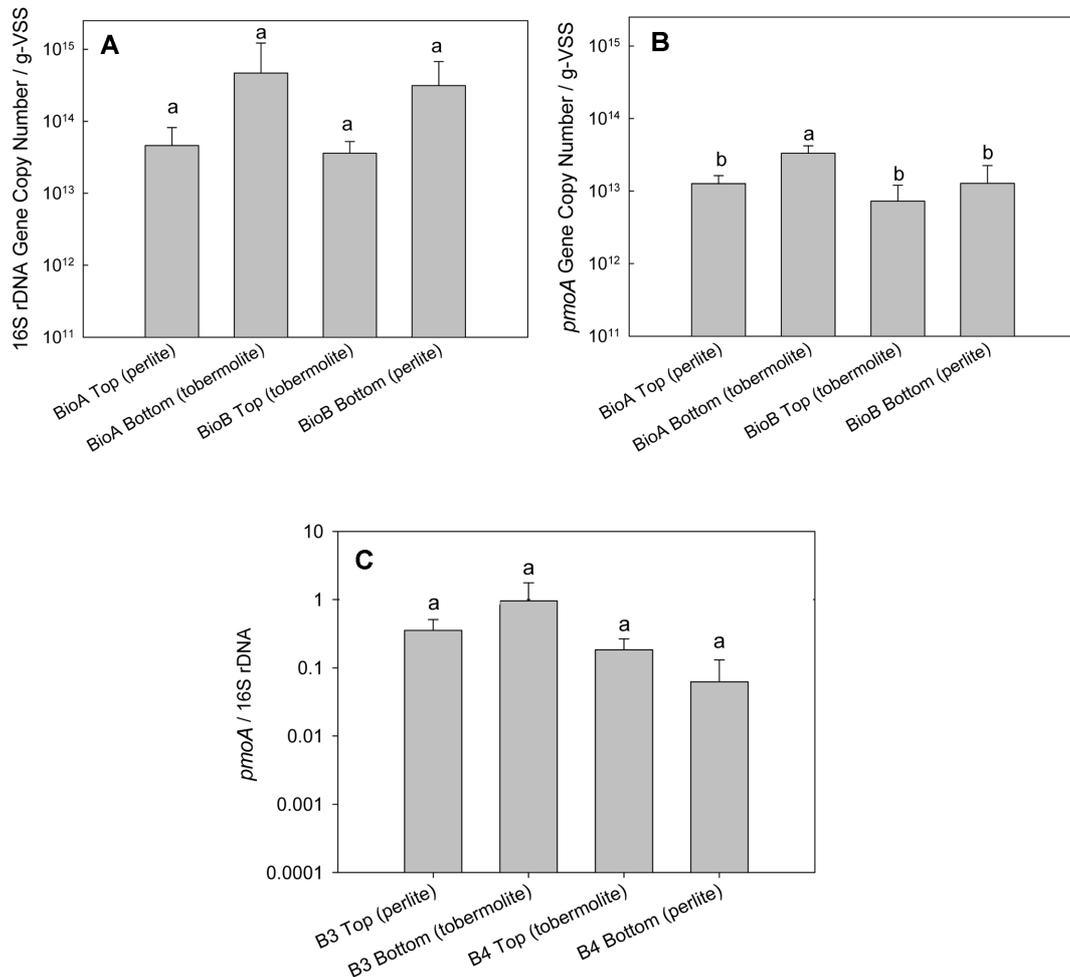


Fig. 3. Quantification of bacteria and methanotrophs in up-flow biofilters.

피대비) 이하로 산소농도가 떨어지는 경우 메탄산화세균의 활성이 급격히 저해되었다는 보고가 있었고, Scheutz 등[20]의 연구결과 뿐만 아니라 Bender와 Conrad [1] 또한 산소가 제한된 조건에서 메탄산화가 전혀 이루어지지 않았다는 결과를 도출한 바 있다. 이는 상단부에 위치한 담체들의 메탄산화능이 높다고 하더라도 바이오필터 운전시 상단부에서 높은 상대습도가 유지되었을 경우 혐기영역 형성 또는 공기흐름 편류 등에 의해 미생물 활성이 저해되었을 수 있다는 가능성을 보여준다[9]. 상위의 결과들과 관련지어 살펴볼 때, perlite와 tobermolite가 각 담체의 순수 메탄산화능이 상단부에 위치한 담체들에서 높았음에도 불구하고 바이오필터내에서 하단부의 메탄농도 감소폭이 크고 메탄산화세균이 많이 존재하는 것으로 나타났다. Streese와 Stegmann [21]은 compost와 mixture material의 메탄 산화능과 메탄 분해능을 비교하여 본 결과, pure compost material이 batch experiment에서 상대적으로 높은 메탄 산화능 및 미생물 밀

도를 나타내었음에도 불구하고 실제 바이오필터에 적용하여 운전한 경우 mixture biofilter가 우수한 메탄산화능을 나타내었다고 보고하였다. 또한, pure compost로 충전한 바이오필터의 메탄분해능이 $62 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ 로 mixture와 multilayer biofilter(각각 40과 $30 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$)에 비하여 우수하였으나, 1년 이상 장기간 운전시 mixture biofilter가 다른 두 바이오필터에 비해 2배 이상의 메탄분해속도로 안정적으로 유지되었다고 보고하였다. 메탄저감용 바이오필터는 미생물의 메탄산화 활성을 이용한 기술이며 이러한 메탄산화가 산소이용성, pH, 및 온도 등 다양한 요인들에 의해 영향받는다라는 것은 이미 많은 연구를 통해 밝혀진 바 있다[6, 15, 16]. Gebert 등[5]은 sand, gravel, porous clay로 이루어진 다층구조의 바이오필터에서 층별 메탄산화세균의 수와 우점종이 다양하게 나타났으며, 이는 층별 깊이와 충전 담체특징에 따라 산소 이용성, 영양원, 수분이용성, 유기물 함량 및 염 농도 등의 다양한 환경인자들의 차이가 바이오필터내 각 층간

의 메탄산화세균 수에 영향을 주었을지도 모른다고 설명하고 있다. 또한, 본 연구에서 사용한 바이오필터가 상향식이었기 때문에 메탄가스가 유입되는 하단에서 메탄산화세균의 증식이 우선적으로 이루어짐으로서 상단으로 공급되는 탄소원인 메탄가스량 자체가 적었기 때문에 메탄산화세균의 활동에 제약이 있었을 가능성도 있다.

요 약

Perlite와 tobermolite 담체를 각각 상·하단(바이오필터 A) 또는 하·상단(바이오필터 B)으로 충전한 상향식 바이오필터에서 상하단의 메탄산화 특성을 비교하였다. 각 바이오필터에서 상단과 하단 담체를 채취하여 메탄산화속도를 측정하고, 정량적 real time PCR 방법을 이용하여 메탄산화세균수를 정량분석 하였다. 혼합담체의 층적배열 차이에 따른 각 담체의 순수 메탄산화속도를 조사한 결과, biofilter A perlite 상단이 $845.16 \pm 64.78 \mu\text{mol} \cdot \text{VS}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 로 tobermolite 하단 $381.85 \pm 42.00 \mu\text{mol} \cdot \text{VS}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 에 비하여 상대적으로 높았다($p < 0.005$). 또한, biofilter B tobermolite의 상단($601.25 \pm 37.78 \mu\text{mol} \cdot \text{VS}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)이 perlite 하단($411.07 \pm 53.02 \mu\text{mol} \cdot \text{VS}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)에 비하여 메탄산화속도가 높았다($p < 0.005$). 바이오필터 A는 상단($1.27\text{E}+13$ pmoA gene copy number/mg-VSS)보다는 하단($3.33\text{E}+13$ pmoA gene copy number/mg-VSS) ($p < 0.05$)에 더 많은 메탄 산화 세균이 존재하였다. 그러나, 바이오필터 B는 상단과 하단간의 메탄 산화 세균수의 차이는 유의하지 않은 것으로 나타났다($p > 0.05$). Perlite와 tobermolite로 충전된 각 담체의 순수 메탄산화속도는 상단부에 위치한 담체들이 높았음에도 불구하고 바이오필터내에서 메탄농도 감소폭이 컸던 하단부에서 메탄산화세균이 많이 존재하였다.

Acknowledgement

This work was supported by the Korea Foundation for the Advancement of Science & Creativity (KOFAC) grant funded by the Korean Government (MEST).

References

- Bender, M. and R. Conrad. 1995. Effect of CH₄ concentrations and soil conditions on the induction of CH₄ oxidation activity. *Soil Bio. Biochem.* **27**: 1517-1527.
- Cho, K. and H. Ryu. 2009. Biotechnology for the mitigation of methane emission from landfills. *Korean J. Microbiol. Biotechnol.* **37**: 293-305.
- Czepiel, P. M., B. Mosher, P. M. Crill, and R. C. Harriss. 1996. Quantifying the effect of oxidation on landfill methane emissions. *J. Geophys. Res.* **101**: 16721-16729.
- Delhomènie, M. C. and M. Heitz. 2005. Biofiltration of air: A review. *Crit. Rev. Biotechnol.* **25**: 53-72.
- Gebert, J., A. Gröngroft, M. Schloter, and A. Gättinger. 2004. Community structure in a methanotroph biofilter as revealed by phospholipid fatty acid analysis. *FEMS Microbiol. Lett.* **240**: 61-68.
- Haththotuwa, H. G. C. K. 2005. Controlling factors affecting microbial methane oxidation in different soil environments. 7th World Congress on Recovery, Recycling and Re-integration. Poster presentation. Abstract no. 164.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007. Climate change 2007: The physical science basis. Cambridge University Press. Cambridge. UK. Chapter 1: 93-128.
- Kim, I. and H. Choi. 2002. Engineering analysis of biofilter. *Korean J. Biotechnol. Bioeng.* **17**: 115-120.
- Kim, I., T. Lee, H. Ryu, and K. S. Cho. 2002. Toluene removal by the Scoria biofilter using microbial consortium isolated by enrichment culture from oil-contaminated soil. *Korean J. Odor Res. Eng.* **1**: 39-46.
- Kim, S., W. Namkoong, J. Park, Y. Park, and N. Lee. 2005. Treatment of benzene vapor gas with compost and calcium silicate porous biofilters. *J. Korean Oil Chemists' Soc.* **22**: 21-27.
- Kim, T. G., E. H. Lee, and K. S. Cho. 2012. Effects of non-methanovolatil organic compounds on microbial community of methanotrophic biofilter. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* DOI 10.1007/s00253-012-4443-z.
- Kim, T. G., E. H. Lee, T. Lee, H. Ryu, and K. S. Cho. 2011. Biofiltration of methane with expanded perlite and granular activated carbon, and comparison of removal efficacies of the packing materials. *Korean Society of Soil and Groundwater Environment*, Spring Conference: pp. 87.
- Lee, E. H., H. Park, Y. S. Ho, H. W. Ryu, and K. S. Cho. 2010. Application of methodology for microbial community analysis to gas-phase biofilters. *Korean Chem. Eng. Res.* **48**: 147-156.
- Melse, R. W. and A. W. Van der Werf. 2005. Biofiltration for mitigation of methane emission from animal husbandry. *Environ. Sci. Technol.* **39**: 5460-5468.
- Namkoong, W., J. S. Park, and N. S. Lee. 2000. Principle and application of biofiltration. *J. Korean Organic Res. Recycling Assoc.* **8**: 60-67.
- Nikiema, J., R. Brzezinski, and M. Heitz. 2007. Elimination of methane generated from landfills by biofiltration: a review. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* **6**: 261-284.
- Nikiema, J. and M. Heitz. 2010. The use of inorganic packing materials during methane biofiltration. *Int. J. Chem. Eng.*, doi:10.1155/2010/573149.
- Philopoulos, A., J. Ruck, D. McCartney, and C. Felske. 2009. A laboratory-scale comparison of compost and sand-compost-perlite as methane-oxidizing biofilter media. *Waste Manag. Res.* **27**: 138-146.
- Ryu, H. W. and K. S. Cho. 2012. Characterization of the bac-

- terial community in a biofilter for the removal of methane, benzene and toluene. *Korean J. Microbiol. Biotechnol.* **40**: 76-81.
20. Scheutz, C., P. Kjeldsen, J. E. Bogner, A. De Visscher, J. Gebert, H. A. Hilger, M. Huber-Humer, and K. Spokas. 2009. Microbial methane oxidation processes and technologies for mitigation of landfill gas emissions. *Waste Manag. Res.* **27**: 409-455.
21. Streese, J. and R. Stegmann. 2003. Design of biofilters for methane oxidation. *Proceedings Sardinia 2003, 9th International Waste Management and Landfill Symposium*, CISA, Cagliari, Italy.
22. Wilshusen, J. H., J. P. A. Hettiaratchi, and V. B. Stein. 2004. Long-term behavior of passively aerated compost methanotrophic biofilter columns. *Waste Manag.* **24**: 643-653.