pISSN: 1225-4517 eISSN: 2287-3503 http://dx.doi.org/10.5322/JES.2013.22.1.109

ORIGINAL ARTICLE

복합악취와 악취농도지수 분석을 통한 국내 하수처리시설 바이오핔터의 악취제거 특성

고병철·박영호·김동일·이민규¹⁾·감상규^{2)*}

한국환경공단 악취관리센터, ¹⁾부경대학교 화학공학과, ²⁾제주대학교 환경공학과

Odor Removal Characteristics of Biofilters in Domestic Sewage Treatment Facilities Analyzing Composite Odor and Odor Quotient

Byung-Churl Ko, Young-Ho Park, Dong-II Kim, Min-Gyu Lee¹⁾, Sang-Kyu Kam²⁾

Odor Management Center, Korea Environment Corporation, Daejeon 302-120, Korea

Abstract

The removal characteristics of composite odor and malodorous substances using 33 biofilters in sewage treatment facilities were investigated. The geometry mean values of composite odor and odor quotient were reduced by 52.7% and 59.2% at the outlet of the biofilters, respectively. The removal efficiencies of the biofiltes for the composite odor and odor quotient show a significant difference statistically(p=0.000<0.05). The median value of odor quotient of sulfur compounds was reduced by 69.1% at the outlet of the biofilter and the odor quotient of the sulfur compound at the inlet and outlet of the biofilter shows a significant difference statistically(p=0.000<0.05); on the other hand, those of the NH₃ and trimethylamine, aldehydes, VOCs and alcohols, organic acids do not.

Key words: Biofilter, Composite odor, Odor quotient, Malodorous substances

1. 서 론

최근 소득수준의 향상과 더불어 국민의 삶의 질과 쾌적한 환경질의 요구가 증대됨에 따라 악취관련 민원이 증가(Ministry of Environment, 2012a)하고 있는 추세이다. 더욱이 도시 규모가 확대됨에 따라 주거지역 및 상업지역 인근에 하수처리시설 등 공공환경시설이 위치하고 있는 경우가 많아 악취 민원의 대상이되고 있다.

악취를 제거하는 방법은 크게 흡착, 연소, 세정 등의 물리화학적 방법과 생물학적 방법으로 구분된다. 물리화학적 방법은 많은 양의 오염물질을 안정적으로 처리하는 장점이 있지만, 유지비가 많이 들고 2차 오 염물질이 발생하는 단점이 있다(Auria 등, 1998). 생 물학적 처리기술은 다른 처리기술에 비해 생물학적으로 분해가능성이 있는 오염물질을 함유한 가스를 보다 실용적, 저비용으로 제거할 수 있는 처리기술 (Kinney 등, 1999; Xi 등, 2006)로 운전관리가 간단하

Received 23 October, 2012; Revised 22 November, 2012; Accepted 23 January, 2013

*Corresponding author: Sang-Kyu Kam, Department of Environmental Engineering, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea Phone: +82-64-754-3444

E-mail: sakyukam@jejunu.ac.kr

⊚ The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
⊚ This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

¹⁾Department of Chemical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

²⁾Department of Environmental Engineering, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea

며, 2차 오염의 염려가 없다는 특징을 가지고 있다 (Park 등, 2005). 특히, 생물학적 처리기술 중에서 대표 적으로 사용되고 있는 바이오필터는 담체 표면에 부착된 미생물의 활동에 의해 악취물질을 산화분해 시키는 것으로(Leson과 Winer, 1991; Swanson과 Raymond, 1997) 농도는 낮으나 배출 유량이 많은 악취물질 처리에 적합하다고 보고되고 있다(Auria 등, 1998; Burgess 등, 2001; Smet 등, 1998; Zilli 등, 2001).

국내에서도 바이오필터를 이용한 악취물질 제거 특성에 대한 많은 연구가 이루어지고 있으며, Kam 등 (2004)은 활성탄/폴리우레탄 복합담체를 충전한 바이 오필터를 이용하여 황화수소를 처리한 결과 EBCT (empty bed contact time) 30초로 운전시 700 ppmv의 황화수소를 99%까지 처리할 수 있었다고 하였다. Park 등(2005)은 4종류의 충전재가 각각 충전된 바이 오필터를 이용하여 VOC 처리효율을 평가하였으며, 활 성탄과 세라믹을 혼합 충전한 바이오필터에서 EBCT 86초로 운전시 12.47 g/m³·hr의 부하율의 아세트알 데하이드를 97.3%까지 처리할 수 있었다고 하였다. 또한 Park과 Kim(2008)은 폐타이어칩을 충전한 바이 오필터를 이용하여 트라이메틸아민(trimethylamine, TMA)을 처리한 결과 공간속도 180 hr⁻¹에서 30 ppm 의 TMA를 80% 이상 제거할 수 있다고 하였다. 그러 나 바이오필터의 처리효율은 사용하는 담체와 미생물 의 종류에 따라 달라지며, 온도, pH, 영양물질 농도, 수분 함량, 상대습도 등이 바이오필터의 처리 효율에 영향을 미칠수 있다(Hodge와 Devinny, 1993, 1994; Leson과 Winer, 1991; Zilli 등, 1993). 아울러 바이오 필터의 처리효율은 복합악취의 농도변화에도 민감할 수 있으며(Namgung 등, 2010), 악취물질의 충격부하 시 악취물질 제거에 취약함을 기존의 연구(Atoche와 Moe, 2004; Sawvel 등, 2008; Zarook 등, 1997)에서 확인할 수 있었다. 지금까지의 연구들은 대부분 실험 실 혹은 소규모 바이오필터에서 단일 악취 또는 몇 종 류의 악취물질에 대해 단기간 동안 수행되었기 때문 에 여러 종류의 악취가 복합적으로 발생하고, 발생원 의 운전 조건에 따라 유입 농도의 변화가 심하며, 간헐 적 운전 및 계절 변화에 따른 온도 변화 등으로 현장에 서의 악취물질 제거 효율과 다소 차이를 보이는 것이 사실이다.

악취 관련 민원이 사람의 후각에 의해 이루어진다는 점에서 악취물질의 제거 효율을 평가할 때 공기회석관능법에 의한 복합악취 측정은 매우 중요한 평가방법이며, Chung 등(2004)의 경우와 같이 기기분석법에의한 악취 물질의 측정농도와 후각 최소감지농도를 이용한 악취의 세기를 평가하는 것도 매우 중요하다.

따라서 본 연구에서는 국내에서 운영중인 18개 하수처리시설에 설치된 33개 바이오필터의 입구와 출구를 대상으로 복합악취와 기기분석법을 이용한 지정악취물질의 농도를 분석함으로써 바이오필터에 의한 복합악취 및 악취농도지수의 제거효율을 평가하고, 지정악취물질의 제거효율에 대한 비교 평가를 통하여하수처리시설에 바이오필터를 설치 운영함에 있어 효과적인 바이오필터 운영 방안을 수립하기 위한 기초자료를 제공하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 조사대상 시설

지방자치단체에서 설치 · 운영하는 국내 18개 하수처리시설의 33개 바이오필터를 대상으로 2011년 1월부터 2011년 10월까지 악취발생 특성을 조사하였다. 지역별로는 강원 1개, 경기 19개, 경남 2개, 부산 8개, 인천 1개 및 충남 2개 시설이며, 바이오필터 용량은 100 m³/min 미만이 11개, 100 m³/min 이상 300 m³/min 미만이 13개, 300 m³/min 이상 500 m³/min 미만이 5개, 500 m³/min 이상 4개 시설이 해당되었다.

2.2. 시료채취 및 분석 방법

조사대상 바이오필터와 해당 하수처리시설이 정상 적으로 가동중인 시점에 악취공정시험방법(National Institute of Environmental Research, 2007)에 따라 바 이오필터 입구와 출구에서 동시에 시료를 채취하였 다. 복합악취 및 지정악취물질 각각에 대한 시료채취 및 분석 방법은 다음과 같으며 Table 1에 간략히 나타 내었다.

복합악취를 측정하기 위해 펌프 내장형의 진공흡 인상자(ENS Eng., Korea)와 polyester aluminum bag(10 L, Top Trading, Korea)을 이용하여 간접흡인 하였으며, 시료채취가 완료된 polyester aluminum bag은 상온(15∼25 ℃)의 유지 및 직사광선을 피하여 보관 및 운반하였으며, 시료채취 후 48시간 이내에 판정 패널 선정시험에 합격한 5인의 패널들이 악취공정 시험방법의 공기희석관능법에 따라 평가하였다.

암모니아는 0.5% 붕산용액 40 mL를 2개의 임핀저에 20 mL씩 나누어 담고 직렬로 연결 한 후 10 L/min으로 5분간 50 L의 시료를 채취하였으며, 시료 채취가완료된 시료는 분석 전까지 4℃ 이하에서 냉장보관 및운반하였다. 암모니아 분석은 인도페놀법을 이용하여청색으로 발색시킨 후 UV/Vis Spectrophotometer (Cary 300, Varian, USA)를 이용하여 640 nm 파장에서 분석하였다.

TMA는 증류수 359 mL에 진한 황산 1 mL를 넣어 혼합한 황산용액 40 mL를 2개의 임핀저에 20 mL씩 나누어 담고 직렬로 연결한 후 10 L/min으로 5분간 50 L의 시료를 채취하였으며, 시료 채취가 완료된 시료는 분석 전까지 4℃ 이하에서 냉장보관 및 운반하였다. TMA의 분석은 분석용 시료용액을 넣은 바이알에 50% KOH 5 mL를 가하고 SPME auto sampler (MPS2, Gerstel, USA)를 이용하여 20분간 반응시킨후 바이알 상충부 기체층으로 TMA가 용출되면 이를 gas chromatograph(GC)에 주입하여 GC-FID(flame ionization detector)로 분석하였다.

황화합물은 복합악취와 동일한 방법으로 채취한 시료를 thermal desorber(Unity/Air Server, Markes, USA)를 이용하여 농축하였으며, 농축된 시료는 황화 합물에 선택성이 좋은 불꽃광도검출기(PFPD)가 설치 된 GC(7890A, Agilent, USA)를 사용하여 분석하였다.

알데하이드류는 MFC(Mass Flow Controller)가 내 장되어 있는 소형펌프(MP-Σ100, Sibata, Japan)를 이용하여 1 L/min으로 5분간 총 5 L의 시료를 채취하였으며, 알데하이드류 측정 시 방해물질로 작용하는 오존을 제거하기 위하여 2,4-DNPH (dinitrophenylhydrazone) 카트리지 전단부에 KI가 채워져 있는 오존 스크러버(Waters, USA)를 이용하였다. 알데하이드의 분석은 2,4-DNPH의 카트리지에 acetonitrile 5 mL를 사용하여 1 mL/min의 속도로 추출하고 UV 검출기를 이용하여 360 nm의 파장에 고정시킨 후 HPLC(1200series, Agilent, U.S.A)를 이용하여 분석하였다.

휘발성유기화합물류는 Tenax-TA 흡착제가 200 mg

이상 충진 되어있는 Tenax-TA 흡착튜브(Supelco, U.S.A)와 MFC(Mass Flow Controller)가 내장되어 있는 소형펌프(MP-∑30, Sibata, Japan)를 이용하였으며, 200 mL/min으로 5분간 총 1 L의 시료를 채취하였다. 측정이 끝난 Tenax-TA 흡착튜브는 4℃이하에서 냉장보관하였으며, GC/MSD (7890A/5973MS, Agilent, USA)로 분석하였다

유기산류는 0.1N-NaOH 수용액을 제조하여 40 mL 2개의 임편저에 20 mL씩 나누어 담고 직렬로 연결 한후 2 L/min으로 5분간 10 L의 시료를 채취하였으며, 시료 채취가 완료된 시료는 분석 전까지 4℃ 이하에서 냉장보관 및 운반하였다. 유기산 분석은 분석용 시료용액를 넣은 바이알에 NaCl 2.3 g을 넣은 후 2% 황산 1 mL를 가하고 충분히 섞은 후 전처리 장비인 Headspace Samplers(TurboMatrix HS 40, PerkinElmer, USA)를 이용하여 shaking(90℃, 20분) 후 바이알 상층부 기체 층으로 유기산이 용출되면 이를 가스크로마토그래피 (GC/FID)로 주입하여 분석하였다.

Table 1. Summary of sampling and analytical methods for malodorous substances

Malodorous substances	Sampling method	Analytical method	
Composite odor	Indirect sampling method	Olfactory	
Ammonia	Boric acid absorption	UV/Vis Spectroph -otometry	
Trimethylamine (TMA)	Sulfuric acid absorption	GC/FID	
Sulfur compounds (hydrogen sulfide, methyl mercaptan, dimethyl sulfide, dimethyl disulfide)	Indirect sampling method	GC/PFPD	
Aldehydes (acetaldehyde, propionaldehyde, butyraldehyde, n-valeraldehyde, i-valeraldehyde)	2,4-DNPH cartridge	HPLC/UV	
VOCs (styrene, toluene, xylene, methyl ethyl ketone, methyl isobutyl ketone, butyl acetate, i-butyl alcohol)	Tenax-TA adsorption tube	GC/MSD	
Organic acids (propionic acid, n-butyric acid, n-valeric acid, i-valeric acid)	Sodium hydroxide solution absorption	GC/FID	

2.3. 악취측정결과의 통계분석

복합악취 및 악취농도지수를 이용하여 바이오필터의 악취제거 효율에 대한 통계량에 유의한 차이가 있는지를 조사하기 위하여 통계 소프트웨어 SPSS(Version 12.0)를 이용하여 통계분석을 실시하였다. 상자그림(box plot)으로 자료의 분포정도를 확인한 결과 복합악취 및 악취농도지수의 분포가 정규분포를 만족하고있지 않으므로 바이오필터에서 악취물질의 제거효율에 대한 비모수검정(Wilcoxon 검정)을 유의수준 0.05에서 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 복합악취 및 악취농도지수를 이용한 바이오필터의 효율 평가

하수처리시설에서 배출되는 악취물질의 종류와 농도는 각 공정과 운전조건에 따라 다르게 나타나며 (Chung 등, 2004; Jung 등, 2006; Park, 2003; Park 등, 2005), 본 연구 대상 하수처리시설에 설치된 바이오필터의 입구 및 출구에서 측정한 복합악취와 악취농도지수는 Table 2 및 Fig. 1과 같다.

악취는 각 물질별로 후각 최소감지농도(Odor Threshold)가 달라 각 물질별 기기분석값인 악취농도 (ppm)로는 악취의 세기를 직접적으로 비교할 수 없으므로, 기기분석을 통하여 측정한 지정악취물질 22종의 각 물질별 농도에 대하여 그 물질의 후각 최소감지 농도(Ministry of Environment, 2001)로 나눈 값을 합산한 악취농도지수(Odor Quotient)를 복합악취와 함께 바이오필터의 처리 효율을 평가하는 지표로 사용하였다.

$$O.Q.(Odor\ Quotient) = \sum_{i=1}^{n} \frac{C_{i,\,measured\ value}}{C_{i,\,threshold}}$$

여기서, O.Q.: 악취농도지수

 $C_{i,measured\ value}$: i 물질의 측정농도(ppm) $C_{i,threshold}$: i 물질의 후각 최소감지농도(ppm)

바이오필터 입구에서의 복합악취는 기하평균이 605 OU/m³이며, 자료의 중앙값을 나타내는 제2사분 위수는 300 OU/m³으로 나타났다. 출구에서의 복합악 취는 기하평균이 입구보다 약 52.7% 감소된 286 OU/m³으로 나타났으며 제2사분위수 또한 52.0%가 감소된 144 OU/m³로 조사되어 바이오필터의 입구에 비하여 출구의 복합악취가 감소됨을 알 수 있었다. 또 한 사분위수 범위는 입구에서 120~1,442 OU/m³를 나타내었으나 출구에서는 100~448 OU/m3로 범위와 크기가 감소되고 있음을 알 수 있으며, 조사대상 바이 오필터의 대부분이 기타 지역 배출구 배출허용기준인 500 OU/m³(Ministry of Environment, 2012b) 이내로 만족하였으나 일부 바이오필터에서는 이를 초과하는 것으로 조사되었다. 이는 바이오필터에 영양물질 공 급이 부적절하고 분무 노즐이 막히는 등 수분 공급이 원활하게 이루어지지 않았거나 pH 조절이 적정하게 이루어지지 않았기 때문인 것으로 조사되었으며, 유 기성 담체를 사용하는 일부 바이오필터의 경우 담체 의 분해 등으로 충진층 높이가 설계치보다 감소하여 EBCT가 매우 짧아졌기 때문인 것으로 사료된다.

악취농도지수의 경우 바이오필터 입구에서의 1,502의 기하평균을 나타내었으며, 자료의 중앙값은 1,000으로 나타났다. 출구에서의 악취농도지수는 기하평균이 입구보다 약 59.2% 감소된 612로 나타났으며 제2사분위수 또한 63.2%가 감소된 368로 조사되어 바이오필터의 입구에 비하여 출구의 악취농도지수가 감소됨을 알 수 있었다. 또한 사분위수 범위는 입구에서 270~6,463을 나타내었으나 출구에서는 145~1,656

Table 2. Statistical summary of composite odor (OU/m³) and odor quotient of inlet and outlet at 33 biofilters of domestic sewage treatment facilities

Item		Geo. Mean	Min.	1st Quartile	2nd Quartile	3rd Quartile	Max.
Composite odor	Inlet	605	100	120	300	1,442	30,000
(OU/m^3)	Outlet	286	100	100	144	448	14,422
Odor Quotient	Inlet	1,502	33	270	1,000	6,463	95,134
	Outlet	612	7	145	368	1,656	59,993

으로 범위와 크기가 감소되고 있는 것으로 조사되어 복합악취의 경우와 전체적으로 유사한 경향을 보였으 며, 악취농도지수가 복합악취에 직접적인 영향을 미 치고 있기 때문인 것으로 사료된다. 그러나 일부 바이 오필터의 경우 복합악취가 감소하는 경우에도 악취농 도지수는 감소하지 않는 것으로 나타나 복합악취와 악취농도지수에 대한 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

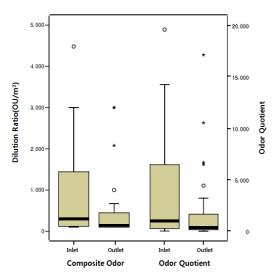


Fig. 1. Box plots of composite odor and odor quotient of the inlet and outlet at 33 biofilters of domestic sewage treatment facilities.

바이오필터 입구와 출구에서의 복합악취 및 악취 농도지수에 대한 Wilcoxon 검정을 유의수준 0.05에서 수행한 결과를 Table 3에 나타내었다. 바이오필터 입구와 출구의 복합악취의 차이를 분석한 결과 유의한 차이가 있는 것으로 나타나(p=0.000<0.05) 바이오 필터를 거치는 동안 복합악취가 감소하고 있음을 알

수 있었다. 악취농도지수의 차이를 분석한 결과 또한 유의한 차이가 있는 것으로 나타났으며(p=0.000< 0.05) 바이오필터를 거치는 동안 악취농도지수가 감소하는 것으로 조사되었다.

3.2. 지정악취물질을 이용한 바이오필터의 효율 평가

복합악취에 영향을 미치는 지정악취물질에 대한 바이오필터의 처리 효율을 평가하기 위하여 지정악취물질 22종을 암모니아 및 TMA(2종), 황화합물(4종), 알데하이드류(5종), VOC 및 알콜류(7종), 유기산류(4종)으로 그룹화(grouping)하여 각각 합산한 악취농도지수를 계산하였으며, 그 분포는 Table 4 및 Fig. 2와 같다.

본 연구에서 황화합물은 다른 물질에 비해 악취농 도지수가 매우 큰 것으로 나타나(Table 4) 바이오필터 입구의 복합악취에 가장 큰 영향을 미치고 있는 것으 로 조사되었으며, 출구에서 악취농도지수의 중앙값은 입구보다 약 69.0% 감소된 290으로 나타남을 알 수 있었다. 또한 사분위수 범위는 입구에서 151~6,415 를 나타내었으나 출구에서는 32~1,528로 그 값과 범 위가 크게 감소되고 있어 조사대상 바이오필터에서 황화합물이 비교적 잘 제거되고 있음을 알 수 있었다. 그러나 일부 바이오필터에서는 미생물의 성장을 위한 영양물질과 수분공급 및 pH 조절이 적절하게 이루어 지지 않고 있으며 조사대상 바이오필터의 EBCT가 대 부분 10~15초 내외로 설계되어 있어 악취농도지수 를 기준으로 80% 이상의 처리효율을 나타내는 경우 가 전체 시설의 약 36% 인 12개에 불과한 것으로 사료 된다.

암모니아 및 TMA에 대한 악취농도지수의 중앙값은 바이오필터 입구에서 1.8로 나타났으며, 출구에서 의 중앙값은 입구보다 약 27.8% 감소된 1.3으로 나타났다. 또한 최대값도 입구에서 313을 보였으나 출구

Table 3. Wilcoxon test for the removal efficiency of composite odor and odor quotient by 33 biofilters of domestic sewage treatment facilities

Item		Mean	SD	Wilcoxon	p
Composite	Inlet	2,889	6,019	-4.199	0.000
Odor(OU/m ³)	Outlet	1,146	2,756	-4.199	0.000
0.10	Inlet	11,110	21,321	2.707	0.000
Odor Quotient	Outlet	5,096	13,252	-3.797	0.000

에서는 49.9% 감소된 157을 나타내었다. 그러나 사분 위수 범위는 입구에서 0.7~29를 나타내었으나 출구에서는 0.4~36으로 범위가 넓게 나타나 대부분의 바이오필터에서는 암모니아 및 TMA가 제거되고 있으나, 일부 바이오필터에서는 황화수소에 비하여 상대적으로 제거 효율이 높지 않은 것을 알 수 있었다. 이는 일부 바이오필터의 함수율이 암모니아 및 TMA의제거에 있어 바이오필터 효율의 제한 요인으로 작용(Chung, 1999)하였으며, 바이오필터의 낮은 pH의 영향도 있는 것으로 사료된다.

알데하이드류에 대한 악취농도지수의 기하평균은 바이오필터 입구에서 53이며, 출구에서는 입구보다 약 12.9% 감소된 47로 나타났다. 또한 사분위수 범위는 입구에서 28~121을 나타내었으나 출구에서는 21~ 107로 그 값이 조금 감소하여 바이오필터에서 알데하 이드류가 일부 제거되고 있는 것으로 나타났다. 그러 나 자료의 중앙값은 입구보다 증가한 54로 나타나 자 료의 50%가 바이오필터 입구보다 더 넓은 범위에 분 포하고 있음을 알 수 있었다. 바이오필터 입구에서 VOC 및 알콜류에 대한 악취농도지수의 기하평균과 중앙값은 각각 0.8과 0.6으로 나타났으며, 출구에서는 입구보다 각각 37.5%, 33.3%가 감소된 0.5와 0.4로 나타났다. 전체적으로는 바이오필터에서 알데하이드 류, VOC 및 알콜류가 일부 제거되고 있는 것으로 나 타났으나, 알데하이드류의 경우 제2사분위수가 출구 에서 54로 입구보다 증가하였으며, VOC 및 알콜류는 제3사분위수가 출구에서 1.8로 입구보다 0.3 증가하 는 것으로 조사되었다. 이는 일부 바이오필터의 경우 유입구의 높은 VOC 농도에 따른 부하량의 증가로 인하여 바이오필터에서 VOC의 제거능이 감소(Lee 등, 2003)하였으며, 바이오필터의 짧은 EBCT 및 낮은 pH의 영향도 있는 것으로 사료된다. 아울러 바이오필터유입구의 복합악취에 미치는 영향은 작을 것으로 예측되지만 방지시설 유입구의 높은 VOC 농도의 경우에대해서는 추가적인 조사가 필요할 것으로 판단된다.

바이오필터에서 유기산류의 제거효율을 평가하기 위하여 악취농도지수를 이용하여 자료 분포를 살펴본 결과 대부분의 시설에서 유입 및 배출농도가 0 ppm으로 나타나고 있으며, 일부의 값은 이상값(outlier)으로 처리되고 있어 백분위수를 이용한 통계량으로는 유의 미한 결과를 도출하기 어려운 것으로 확인되었다.

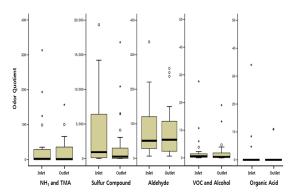


Fig. 2. Box plots for odor quotient of malodorous substances of inlet and outlet at 33 biofilters of domestic sewage treatment facilities.

Table 4. Statistical summary for odor quotient of malodorous substances of inlet and outlet at 33 biofilters of domestic sewage treatment facilities

Item		Geo. Mean	Min.	1st Quartile	2nd Quartile	3rd Quartile	Max.
NIII 1/DAA	Inlet	-	0.0	0.7	1.8	29	313
NH ₃ and TMA	Outlet	-	0.0	0.4	1.3	36	157
C-161-	Inlet	-	0.0	151	935	6,415	95,000
Sulfur compounds	Outlet	-	0.0	32	290	1,528	59,949
Aldehydes	Inlet	53	6.7	28	51	121	337
	Outlet	47	6.7	21	54	107	261
VOCs and Alcohols	Inlet	0.8	0.1	0.2	0.6	1.5	280
	Outlet	0.5	0.0	0.1	0.4	1.8	1,067
O	Inlet	-	0.0	0.0	0.0	0.0	144
Organic Acids	Outlet	-	0.0	0.0	0.0	0.0	73

지정악취물질의 그룹별 악취농도지수를 이용하여 바이오필터의 처리 효율에 대한 Wilcoxon 검정을 유 의수준 0.05에서 수행한 결과를 Table 5에 나타내었 다. 바이오필터 입구와 출구의 황화합물 악취농도지 수의 차이를 분석한 결과 유의한 차이가 있는 것으로 나타나(p=0.000<0.05) 바이오필터를 거치는 동안 황 화합물 악취농도지수가 감소하고 있음을 알 수 있었 다. 그러나, 암모니아 및 트라이메틸아민 악취농도지 수의 차이를 분석한 결과 유의순준 0.05에서 유의하 지 않은 것으로 나타나(p=0.125>0.05), 통계적으로 바이오필터 입구와 출구에서 암모니아 및 트라이메틸 아민의 농도 차이가 없는 것으로 분석되었다. 또한 알 데하이드류(p=0.806), VOCs 및 알콜류(p=0.624), 유 기산(p=0.753)에 대한 바이오필터 입구와 출구의 악 취농도지수 차이를 분석한 결과 유의확률이 유의수준 (0.05) 보다 높게 나타나, 통계적으로 바이오필터에서 해당 물질이 제거되지 않고 있음을 알 수 있었다.

Table 5. Wilcoxon test for the removal efficiency of malodorous substances by 33 biofilters of domestic sewage treatment facilities using their odor quotient

Item		Mean	SD	Wilcoxon	p
NIII I TMA	Inlet	29	66	1 522	0.125
NH ₃ and TMA	Outlet	20	35	-1.533	
Sulfur compounds	Inlet	10,980	21,322	4 1 4 5	0.000
	Outlet	4,962	13,264	-4.145	
Aldehydes	Inlet	82	77	-0.245	0.806
	Outlet	72	69	-0.243	
VOCs and Alcohols	Inlet	11	49	0.400	0.624
	Outlet	34	185	-0.490	
Organic Acids	Inlet	8	29	-0.314	0.753
	Outlet	7	20	-0.314	0.733

앞서 언급한 바와 같이 바이오필터는 저비용의 실용적인 악취 제거기술로서 황화합물 뿐만 아니라 다양한 악취물질을 처리할 수 있는 장점이 있으나, 국내하수처리시설에 설치된 바이오필터의 운영상 몇 가지문제점을 확인하였고 이에 대한 개선이 필요한 것으로 조사되었다.

바이오필터의 처리효율은 궁극적으로 미생물의 흡 수 및 분해에 의존하므로 이들 미생물의 최적 생장조 건을 유지해 주는 것이 가장 중요하다. 따라서 미생물 의 성장에 필요한 영양분을 적절히 공급하고 담체 내 적정 함수율을 유지할 수 있도록 수분을 공급하며, 약 품 주입을 통한 적정 pH 유지가 필요하다. 특히, 순환 수 공급을 위한 분무 노즐이 막히는 경우가 많으므로 주기적인 점검이 필요할 것으로 판단된다. 본 연구에 서는 바이오필터의 온도에 따른 영향을 확인하지는 못하였으나, 미생물의 생장에 필요한 적정 온도를 유 지하고 영양분 및 수분 공급배관 등에 대한 동결 방지 를 위한 대책 또한 매우 중요할 것으로 사료된다. 아울 러, 바이오필터를 장기간 운전시 담체의 막힘으로 압 력손실이 증가하고 처리 효율이 감소하므로 바이오필 터에 압력계를 설치하여 바이오필터 압력손실 변화를 지속적으로 관리하여야 하며 특히 유기성 담체를 사 용할 경우에는 담체의 교환주기를 적절하게 관리하여 야 할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 국내 하수처리시설에 설치되어 운영중인 33개 바이오필터 입구와 출구에서 복합악취와 기기분석법을 이용한 지정악취물질의 악취농도지수를 분석하여 바이오필터의 악취제거 특성을 평가하였다.

바이오필터 출구에서 복합악취의 기하평균은 입구보다 약 52.7% 감소된 286 OU/m³으로 나타났으며, 제2사분위수 또한 52.0%가 감소된 144 OU/m³로 조사되어 바이오필터의 입구에 비하여 출구의 복합악취가 감소됨을 알 수 있었다. 또한 바이오필터 처리 효율에 대한 Wilcoxon 검정을 유의수준 0.05에서 수행한결과 바이오필터 입구와 출구의 복합악취는 유의한차이가 있는 것으로 나타나(p=0.000<0.05) 바이오필터를 거치는 동안 복합악취가 감소하고 있음을 알 수있었다.

지정악취물질 22종의 각 물질별 농도에 대하여 그물질의 후각 최소감지농도로 나는 값을 합산한 악취 농도지수의 기하평균은 바이오필터 출구에서 입구보다 약 59.2% 감소된 612로 나타났으며, 제2사분위수

또한 63.2%가 감소된 368로 조사되어 바이오필터의 입구에 비하여 출구의 악취농도지수가 감소됨을 알 수 있었다. 또한 바이오필터 입구와 출구의 악취농도 지수는 Wilcoxon 검정 결과 유의한 차이가 있는 것으 로 나타나(p=0.000<0.05) 바이오필터를 거치는 동안 악취농도지수가 감소하는 것으로 나타났다.

복합악취에 가장 큰 영향을 미치고 있는 황화합물악취농도지수의 중앙값은 입구에서 935로 나타났으며, 출구에서는 입구보다약 69.0% 감소된 290으로 나타났다. 또한 바이오필터 처리 효율에 대한 Wilcoxon 검정 결과 바이오필터 입구와 출구의 황화합물 악취농도지수는 유의한 차이가 있는 것으로 나타나(p=0.000<0.05) 바이오필터를 거치는 동안 황화합물이 비교적 잘 제거되고 있음을 알 수 있었다. 그러나암모니아 및 트라이메틸아민, 알데하이드류, VOC 및알콜류, 유기산류는 사분위수 또는 기하평균 등에서조금 감소하는 경향을 보였으나, 각각의 제거효율에대한 Wilcoxon 검정 결과 유의하지 않은 것으로 분석되었으며 통계적으로 바이오필터에서 해당 물질이 제거되지 않고 있음을 알 수 있었다.

조사대상 일부 바이오필터의 경우 운영상의 문제점을 확인하였으며, 미생물의 생장조건을 유지하고 악취 처리효율을 향상시키기 위하여 영양분을 공급하고 담체 내 적정 함수율을 유지할 수 있도록 수분을 공급하며, 적정 pH 유지가 필요한 것으로 판단되었다. 특히, 순환수 공급을 위한 분무 노즐을 주기적으로 점검하고 바이오필터에 압력계를 설치하여 바이오필터압력손실 변화 및 담체의 교환주기를 적절하게 관리하여야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- Atoche, J. C., Moe, W. M., 2004, Treatment of MEK and toluene mixtures in biofilters: Effect of operating strategy on performance during transient loading, Biotechnol. Bioeng., 86(4), 468-481.
- Auria, R., Aycaguer, A. C., Devinny, J. S., 1998, Influence of water content on degradation rates for ethanol in biofiltration, J. Air Waste Manage. Assoc., 48(1), 65-70.
- Burgess, J. A., Parsons, S. A., Stuetz, R. M., 2001,

- Developments in odour control and waste gas treatment biotechnology: a review, Biotechnol. Advances, 19, 35-63.
- Chung, Y. J., 1999, Odor removal by using compost and granular scrap tires, J. Korean Soc. Water & Wastewater, 13(1), 43-50.
- Chung, G. H., Kim, S. T., Park, M. S., Chung, J. H., 2004, A survey on the odor emission characteristics in a sewage treatment plant, Korean J. Odor Research & Eng., 3(4), 225-233.
- Hodge, D. S., Devinny, J. S., 1993, Modeling removal of air contaminants by biofiltration, J. Environ. Eng., 12(1), 21-32.
- Hodge, D. S., Devinny, J. S., 1994, Biofilter treatment of ethanol vapors, Environ. Prog., 13(3), 167-173.
- Jung, B. J., Jang, Y. K., Lee, E. Y., Lee, H. Y., Hwang, H. W., Kim, K., 2006, Characteristics of odor and VOCs emitted in sewage water treatment plant, Korean J. Odor Research & Eng., 5(4), 245-251.
- Kam, S. K., Kang, K. H., Lim, J. K., Lee, M. G., 2004, Removal characteristics of H₂S in the biofilter packed with activated carbon/polyurethane composite media, J. Enviro. Sci., 13(1), 47-53.
- Kinney, K. A., Loehr, R. C., Corsi, R. L., 1999, Vaporphase bioreactors: avoiding problems through better design and operation, Environ. Prog., 18, 222-230.
- Lee, M. G., Jun, P. J., Lee, D. H., Kam, S. K., 2003, Removal of toluene vapor in the biofilter packed with activated carbon/polyurethane composite media, J. Korean Ind. Eng. Chem., 14(7), 864-868.
- Leson, G., Winer, A. M., 1991, Biofiltration: An innovative air pollution control technology for VOC emissions, J. Air Waste Manage. Assoc., 41(8), 1045-1054.
- Ministry of Environment, 2001, A study on the improvement of odor sources management, 181.
- Ministry of Environment, 2012a, Comprehensive plan for odor prevention, 3-44.
- Ministry of Environment, 2012b, Offensive odor control law.
- Namgung, H. K., Shin, S. K., Hwang, S. J., Song, J. H., 2010, Transient behaviors of a two-stage biofilter packed with immobilized microorganisms when treating a mixture of odorous compounds, Environ. Eng. Res., 32(12), 1126-1133.
- National Institute of Environmental Research, 2007,

- Standard method of odor compounds.
- Park, G. H., Oh, G. Y., Lee, J. H., Jung, K. H., Jung, S. Y., 2005, Comparison of odor characteristics emitted from the 3 type of sewage treatment plant, Korean J. Odor Research & Eng., 4(4), 196-206.
- Park, H. J., Kim, C. G., 2008, Biodeodorization of trimethylamine by biofilter packed with waste tire-chips, Environ. Eng. Res., 30(8), 789-797.
- Park, J. D., Suh, J. H., Lee, H. S., 2005, A study on the removal characteristics of VOCs and odors with biofilter, J. Environ. Sci., 14(9), 843-849.
- Park, S. J., 2003, A Study on Odor Concentration of Malodorous Gases Emitted from Sewage Treatment Plants Using Air Dilution Sensory Test, Korean J. of Odor Research & Eng., 2(1), 32-37.
- Sawvel, R. A., Kim, B., Alvarez, P. J. J., 2008, Removal of volatile organic compounds at extreme shock loading using a scale-up pilot rotating drum biofilter, J. Air Waste Manage. Assoc., 58, 1407-1414.
- Smet, E., Lens, P., Langenhove, H., 1998, Treatment of waste gases contaminated with odorous sulfur

- compounds, Critical Rev. Environ. Sci. Technol., 28, 89-117.
- Swanson, W. J., Raymond C. L., 1997, Biofiltration: Fundamentals, design and operations principles, J. Environ. Eng., 54, 538-546.
- Xi, J., Hu, H. Y., Qian, Y., 2006, Effect of operating conditions on long-term performance of a biofilter treating gaseous toluene: Biomass accumulation and stable-run time estimation, Biochem. Eng. J., 31(2), 165-172.
- Zarook, S. M., Shaikh, A. A., Ansar, Z., Baltzis, B. C., 1997, Biofiltration of volatile organic compound (VOC) mixtures under transient conditions, Chem. Engineer. Sci., 52(21-22), 4135-4142.
- Zilli, M., Converti, A., Lodi, A., Del Borghi, M., Ferraiolo, G., 1993, Phenol removal from waste gases with a biological filter by *Pseudomonas putida*, Biotechnol. Bioeng., 41, 693-699.
- Zilli, M., Palazzi, L., Sene, L., Converti, A., Borghi, M. D., 2001, Toluene and styrene removal from air in biofilters, Process Biochemistry, 37, 423-429.