

# 미생물반응기를 이용한 악취 및 휘발성유기화합물 저감기술의 적용사례 및 발전방향

송 지 현

세종대학교 토목환경공학과

## Applications and Developments in Biological Treatments for Odor and Volatile Organic Compounds Removal

JiHyeon Song

Civil and Environmental Engineering, Sejong University

### 1. 서론

악취 및 휘발성유기화합물(volatile organic compounds, VOCs)을 제어하기 위한 방법은 크게 물리화학적 방법과 생물학적 방법으로 구분된다. 전통적으로, 활성탄 흡착(adsorption), 세정법(scrubber), 냉각응축(cryogenic condensation), 촉매연소(catalytic thermal oxidation), 직연소(incineration), 탈취제(deodorant) 등의 물리·화학적 방법이 주요 악취 저감기술로 사용되었다. 물리화학적 악취 저감기술의 장점으로는 안정적인 처리효율을 들 수 있지만, 높은 운전비용 및 2차 오염물질의 발생과 같은 여러 단점들도 대두된다. 외부 에너지원의 공급이 필수적인 연소법의 경우에는 최근 급격한 유가 상승으로 인해 고유량 저농도 악취가스에 대한 적용타당성이 낮아지고 있다.

반면 생물학적 악취제어 방법은 충전 담체(packing materials)의 표면에 미생물막을 형성시킨 후 부착미생물에 의해 악취 유발물질을 생분해시키는 기술로, 충전형 생물여과법(packbed-bed biofiltration)법이 주를 이루고 있다. 충전형 생물여과법은 유지관리비용이 적어 경제적이며 2차 오염물질의 발생이 적다는 장점이 있다.<sup>1-5)</sup> 그러나 생물여과법은 악취물질 부하량에 따라 제거효율이 안정적이지 못하며, 운전조건에 따라 악취 및 VOCs 제거효율이 급변하는 문제가 발생하곤 한다.<sup>5-7)</sup>

따라서 물리화학적 저감기술과 생물학적 저감기술들은 각각의 장단점에 따라 적용가능 대상, 농도 범위, 초기시설비, 유지관리 비용 등에 큰 차이를 보인다. Fig. 1에는 악취 및 VOCs가 함유된 공기유량과 농도에 따른 최적 적용가능기술(best available control technology, BACT)이 제시되어 있다. 즉, VOCs 유출 농도가 높은 경우에는 연소법 또는 응축회수법이 BACT라고 할 수 있으며, 배출 농도가 낮은 경우에는 공기 유량에 따라 흡착법 또는 생물여과법이 가장 적절한 제어 수단이 된다. 하지만 Fig. 1에서 제시한 악취 및 VOCs 저감기술들의

적용 범위가 항상 일정하게 고정되어 있는 것은 아니며, 최근 신기술의 개발 및 기존 기술의 개선이 빠르게 진행되면서 BACT에 대한 판단 기준이 확대·재편되고 있다.

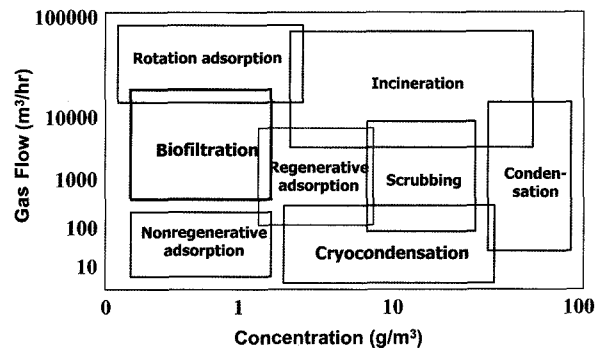


Fig. 1. Applications of various technologies for odor and volatile organic compounds treatments(adapted from van Groenestijn and Hesselink<sup>1)</sup>).

특히 생물여과법은 1950년대 미국에서 하수처리장 악취 제어를 위해 토양탈취(soil filter) 기술로 시작된 후, 퇴비, 나무 껍질(wood bark), 플라스틱, 세라믹 구조체 등의 새로운 담체가 개발 보급되면서 저농도 악취를 저감하기 위한 최적기술로 자리 잡고 있다. 또한 1980년대 이후에는 생물여과법에 대한 연구 개발 노력도 급격하게 증가하기 시작하여, 하수처리장이나 퇴비화 공장에서 발생하는 복합 악취이외에도 화학공장 등에서 발생하는 VOCs 처리에 적용되고 있다. 특히 기술 수준이 앞서있는 유럽에서는 생물여과법이 현장에 실제 적용된 건수와 적용된 업종이 증가하고 있다. 국내에서도 하수처리장과 복합 악취 발생시설에 충전담체형 생물여과 반응기가 많이 보급되어 있으며, 기타 제조업 공정에서 발생하는 VOCs 저감기술로 적용되는 추세이다.

본 총설에서는 현재까지 이루어졌던 담체충전형 생물여과법의 연구동향을 외국 사례를 중심으로 개괄하고자 한다. 또한 악취 및 VOCs 제거효율의 증대와 미생물반응기 운전의

E-mail: songjh@sejong.ac.kr

Tel: 02-3408-3819

Fax: 02-3408-3332

안정성 향상을 위해 현재 진행되고 있는 다양한 연구 방향과 성과를 소개하고자 한다.

## 2. 생물여과법 연구 및 적용 사례

미생물 반응기에 대한 연구 및 적용 사례는, ① 반응기 운전방식, ② 처리대상 대상물질 종류와 농도, ③ 처리 공기 유량 및 공탑 체류시간(empty bed gas residence time, EBRT), ④ 담체 종류 등에 따라 분류할 수 있다. 이들 인자들에 따라 생물여과 반응기 설계 및 온도, 습도, pH 조절 등의 운전조건도 크게 달라진다. 일반적으로 생물여과 반응기의 운전효율과 반응특성은 주어진 공기 체류시간 조건에서 오염물질 제거효율과 분해능(elimination capacity, EC)으로 나타내며, 다음의 주요 식들이 쓰이고 있다.

$$EBRT(sec) = \frac{V(m^3)}{Q(m^3/sec)} \quad (1)$$

$$Removal\ Efficiency(RE, \%) = \frac{C_i - C_o}{C_i} \times 100 \quad (2)$$

$$Elimination\ Capacity(EC, g/m^3/hr) = \frac{Q(C_i - C_o)}{V} \quad (3)$$

여기서, V는 미생물반응기의 유효체적(m<sup>3</sup>), Q는 유입공기 풍량(m<sup>3</sup>/sec), Ci는 반응기 유입농도(g/m<sup>3</sup>), Co는 반응기 유출농도(g/m<sup>3</sup>)이다.

## 2.1. 생물여과 미생물반응기 운전방식 및 대상 오염물질

생물여과 미생물반응기는 일반적으로 액상 순환과 미생물막 형성 여부에 따라, 바이오필터(biofilter)와 바이오텀리클링필터(biotrickling filter)로 크게 구분된다. 바이오필터는 액상 순환이 없는 또는 최소한의 액상을 공급하는 상태에서 담체 표면에 부착 성장하는 미생물막에 의해 악취 및 VOCs가 처리되는 방식이며, 바이오텀리클링필터는 미생물이 함유된 액상이 반응기 내부에서 연속적으로 순환하면서 오염물질을 제거하는 방식이다.

생물여과 미생물반응기는 대상 오염물질의 용해도 또는 헨리상수에 따라, 소수성(hydrophobic) 물질에는 바이오필터를, 친수성(hydrophilic) 물질에는 바이오텀리클링필터를 적용하는 것이 더 유리하다고 알려져 있다.<sup>1,2)</sup> 최근에는 바이오필터와 바이오텀리클링필터로 명확히 구분하지 않고 혼합형으로 운전하는 방식이 도입되고 있으며, 명칭도 구분 없이 바이오필터로 부른다. 이 경우 최소한의 액상을 순환시켜 친수성 물질의 세정효과와 담체의 건조방지 효과를 동시에 이룰 수 있다. 그러나 그동안 연구된 결과들에 의하면 미생물반응기 종류에 따른 대상물질의 분해효율 차이는 매우 적으며, 오히려 미생물반응기 운전조건(pH, EBRT 등)에 따른 영향이 더 큰 것으로 판단된다.

Table 1에는 실험실규모 생물여과 미생물반응기 연구에서 사용된 대상물질, 미생물반응기 종류, 담체, 공탑체류시간(EBRT), 제거효율(RE), 최대분해능(ECmax)을 제시하였다. 생물여과 미생물반응기의 실험실규모 연구에서는 다양한 대상물질에 대한 연구 결과가 보고되고 있으나, 실제 현장에 적용된 사례를 살펴보면 미생물반응기는 하수처리장이나 퇴비화 시설에

**Table 1.** Removal of odor and volatile organic compounds in laboratory packed-bed bioreactors(adapted from Iranpour et al.<sup>8)</sup>)

Pollutants	Bioreactor type	Packing materials	EBRT(sec)	RE(%)	EC(g/m <sup>3</sup> /h)	Reference	
Non-chlorinated VOCs	Styrene	biofilter	peat with clay & lime	81	70	12	[11]
	Ethanol	biofilter	peat	150	30	30	[12]
	Xylenes	biofilter	peat	102	52	43	[13]
	Hexane	biofilter	compost + perlite	30-120	>95	21	[14]
	Toluene	biofilter	peat + perlite	162-516	66-100	5-25	[15]
	Toluene	biotrickling filter	PP pall rings	56	90	80	[16]
	Methyl ethyl ketone, propionaldehyde	biotrickling filter	activated carbon	1-6	50-90	<160	[17]
	BTEX	biotrickling filter	coal	240	80	115	[18]
Chlorinated VOCs	DCM	biofilter	compost + perlite	42-60	>98	15	[19]
	TCE	biofilter	compost + GAC	336	>95	2.4	[20]
	Dichlorobenzenes	biotrickling filter	ceramic saddles	180-560	79-96	60	[21]
	DCM	biotrickling filter	ceramic saddles	60	20-100	157	[22]
Odorous N & S compounds	Methylamine	biofilter	peat + perlite + fern chips	220	100	2.6	[23]
	NH <sub>3</sub>	biofilter	compost + GAC	68	92-100	17	[24]
	DMS	biofilter	compost + limestone	27	97	48	[25]
	Triethylamine	biofilter	compost + chaff	11-60	100	140	[26]
	H <sub>2</sub> S NH <sub>3</sub>	biotrickling filter	Ca-alginate beads	72	>95	3.8 5.6	[27]
	Nitrobenzene	biotrickling filter	perlite	24	80-90	13.1	[28]

서 배출되는 악취 저감에 주로 사용되고 있다. 최근에는 생물여과 미생물반응기의 적용 범위가 확대되어, 토양오염 복원현장에서 배출되는 VOCs 처리나 페인트 도장공정에 실제 적용한 사례가 보고되고 있다.<sup>9,10)</sup>

충전여과형 미생물반응기의 악취 및 VOCs 저감효율은 공기 공탑체류시간의 영향이 매우 크다. Table 1에 제시된 실험실규모 미생물반응기의 운전조건을 살펴보면 아주 광범위한 체류시간(1~560초)이 적용되고 있으며, 일반적으로 20~90초 수준의 공탑체류시간이 주로 사용되고 있다. 공탑체류시간이 길어질수록 처리효율은 증가하며, 따라서 실제 현장에 적용된 바이오필터는 30초 이상의 공탑체류시간을 적용하고 있다. 또한 현장적용 사례를 살펴보면 바이오트리클링필터에서 보다 짧은 공탑체류시간을 사용하는 경우가 많은데, 이는 바이오필터보다는 바이오트리클링필터에서 운전변수 조절이 용이하며 미생물 농도도 높게 유지할 수 있기 때문이라 판단된다. 그러나 생물여과 미생물반응기의 운전효율은 대상물질과 운전방식에 따라 크게 달라지며, 따라서 미생물반응기에 가장 적절한 공탑체류시간이나 유입농도 범위를 일반화해서 제시하기는 어렵다.

**2.2. 처리 대상 오염물질**

미생물반응기에서 처리될 수 있는 오염물질로는, BTEXS (benzene, toluene, ethylbenzene, xylenes and styrene) 등의 방향족 화합물과 지방족 화합물, 염소계 유기용매, 그리고 질소 및 황 함유 악취물질 등이 있다. Table 2에는 생물여과 미생물반응기에 적용된 개별 VOC 종류와 문헌에 보고된 최대분해능 범위를 제시하였다. 미생물반응기의 VOCs 제거효율

**Table 2.** Volatile organic compounds treated using bioreactors and their maximum elimination capacities(ECmax)

Compounds		ECmax (g/m <sup>3</sup> /hr)	References
Alkanes	hexane	3-21	[14, 29]
	pentane	2-3.5	[30]
Ketones	methyl ethyl ketone (MEK)	22-120	[31, 32]
	methyl isobutyl ketone (MIBK)	25-30	[31]
	acetone	10-120	[33]
Organic acids	ethyl acetate	130-240	[14, 34]
	butyl acetate	40	[35]
Alcohols	methanol	100-120	[36]
	ethanol	20-130	[37, 38]
Aromatics	benzene	2-47	[39, 40, 41]
	toluene	20-120	[5, 15, 16, 29, 34]
	ethylbenzene	15-30	[42, 43]
	xylenes	15-25	[3, 13]
	styrene	30-140	[11, 45, 46, 47]
Chlorinated aliphatics	dichloromethane(DCM)	< 15	[19, 22]
	trichloroethylene(TCE)	< 2.4	[20]

은 다양한 운전변수의 영향을 받지만, 일반적으로 carboxyl acids > alcohols > esters > ketones > aromatics > alkanes > chlorinated compounds 순으로 분해율이 떨어진다.<sup>29)</sup> 유기산과 알코올류는 수용성이어서 쉽게 미생물막(biofilm)에 전달 가능하며 분해율도 높아 빠른 속도로 제거 가능하다. 반면 염소계 유기화합물은 분해효율도 낮으며, 공대사(cometabolism) 반응에 의존하는 경우에는 일차 기질(primary substrate)이 동시에 공급되어야 하기 때문에 생물여과 미생물반응기에 적용하기 어렵다. 질소나 황을 함유한 악취물질들은 일반적으로 성장속도가 느린 독립영양(autotrophic) 미생물에 의해 분해되기 때문에 분해속도가 느린 편이나, 적용 반응기 종류나 운전방법에 따라 편차가 매우 심하다.

**2.3. 담체(packing materials) 종류**

생물여과 미생물반응기의 악취 및 VOCs 분해작용은 담체 표면에 부착 성장하는 생물막(biofilm)에 의존하며, 따라서 담체의 종류 및 특성은 오염물질 제거효율 및 운전특성에 큰 영향을 미치게 된다. 우수한 바이오필터 담체의 조건으로는,<sup>48,49)</sup> (1) 물성 측면에서 담체는 가볍고(낮은 밀도), 시공이 용이하며, 가격이 저렴하여야 하며, 물질전달률을 높이기 위해 담체의 비표면적(specific surface area)이 넓어야 한다. (2) 생물막 성장 측면에서는 운전초기에 담체 표면의 생물막 형성이 용이하고, 생성된 생물막은 쉽게 탈리(detachment)되지 않아야 하며, 수분 및 영양염류를 함유하고 있거나, 유지하기 용이하여야 한다. (3) 바이오필터 운전 측면에서는 미생물 성장에 의한 폐색(clogging)이나 압력손실(pressure drop)이 적고, 기체흐름의 단극(channeling) 현상을 최소화할 수 있어야 한다.

초기 바이오필터에서는 퇴비(compost), 토탄(peat), 나무껍질 등의 유기성 천연물질이 간단한 가공 후에 담체로 직접 사용되었다. 이들 천연 유기성 담체들은 가격이 저렴하고, 오염물질 분해 미생물과 영양염류를 자체적으로 포함하고 있는 경우가 많아 유럽 등지에서 오랫동안 사용되었다. 그러나 퇴비 담체에서는, 압밀(compaction) 또는 압력손실 증가 현상, 영양염류 고갈에 따른 외부질소원 공급 등의 문제가 나타난다.<sup>6)</sup>

천연 유기물질 담체의 문제점을 보완하기 위해 다양한 인공담체들이 개발되어 상용화되었으며, 인공담체로는 세라믹(ceramic)재질 입상구조체,<sup>5)</sup> 플라스틱(plastic) 구조체,<sup>50)</sup> 폴리우레탄(polyurethane)<sup>51)</sup> 및 섬유성 구조체 등을 들 수 있다. 인공담체들은 일반적으로 화학적·기계적 내구성과 안정성이 뛰어나며, 다양한 공극(pore) 구조를 갖는 구조체로 성형하기 쉽다는 장점을 가지고 있다. 그러나 인공 담체를 이용한 미생물반응기에서도 여러 문제점들은 나타나는데, 초기 미생물 성장 및 생물막 형성이 어렵고, 지속적인 영양염류 공급이 요구되며, 미생물을 최적 조건에서 유지 조절하기 곤란하다는 점을 들 수 있다.<sup>6)</sup>

**3. 기술적용의 문제점 및 해결방안**

생물여과 미생물반응기를 실제 현장에서 운전할 때 가장

많이 거론되는 문제점으로 불안정한 처리효율을 들 수 있다.<sup>2,6,7,52</sup> 충전담체형 미생물반응기(즉, 바이오필터)를 장기간 운전하는 경우 오염물질 제거효율이 급감하는 현상이 나타나는데, 이는 미생물의 신진대사에 필요한 영양물질(특히 질소원)이 부족해질 때 나타나곤 한다. 발표된 연구 결과에 따르면 퇴비 담체에는 250~1000 mg-N/kg 이상의 질소원을 함유하고 있어야 VOCs 처리효율이 감소하지 않으며,<sup>53,54</sup> 인공담체에도 오염물질의 유입 부하량에 따라 일정한 질소원을 외부에서 지속적으로 공급해 주어야 한다.<sup>52</sup>

미생물 활성도와 시공간적 분포도 미생물반응기 운전효율에 큰 영향을 미친다.<sup>56</sup> 바이오필터에서는 미생물이 부착 고정되어 성장하므로, 기질(substrate)이 연속 공급되는 반응기 입구부분에는 활성미생물 축적량이 많은 반면 반응기 출구부분은 기질 공급량이 적어 활성미생물 성장속도가 느린 불균일한 성장을 하게 된다. 활성미생물이 불균일하게 성장하면 전체 반응기를 효율적으로 사용할 수 없으며, 운전 변수가 급변할 때 효과적으로 대처하지 못하는 문제가 발생한다. 활성미생물의 불균일 분포 문제는 주기적인 역세척이나, 담체 교반 또는 공기흐름 방향변동 등의 방법으로 해결할 수 있다.

불균일 성장과 함께 바이오필터의 불안정한 운전효율과 관련하여 자주 나타나는 문제가 폐색(clogging)이다.<sup>2,3,6</sup> 폐색은 주로 유기물(VOCs, 유기성 황화합물 등)을 분해 제거하는 충전형 바이오필터에서 미생물이 과다 증식하여 담체 사이의 공극을 막아 정상적인 공기 흐름을 방해하는 현상이다. 폐색이 심화되면 미생물반응기의 압력손실이 커지고 궁극적으로는 공기가 통과할 수 없는 상태에 도달한다. 따라서 생물여과 미생물반응기를 설계할 때에는 악취 및 VOCs와 미생물 종류에 따른 미생물 증식 속도와 폐색주기를 계산하고 적절한 미생물 제어방안을 고려하여야 한다.

가장 일반적인 폐색 제어 방안은 역세척(backwashing)이며, 고압의 물이나 공기를 분사하여 담체 표면에 과도하게 끼어 있는 미생물을 제거한다.<sup>55,56</sup> 그러나 역세척 방법은 담체의 종류에 따라 적용이 불가능한 경우가 있으며, 미생물 제거효과에 비해 유지관리비가 높게 드는 단점이 있다. 최근 스폰지 형태인 폴리우레탄(polyurethane) 담체를 이용하여 과도하게 성장한 미생물을 기계적으로 짜내는 방법도 적용되고 있으며,<sup>51</sup> 교반방식의 기계적 방법으로 과도하게 축적된 미생물을 분리 제거하는 방법이 개발 적용되고 있다.<sup>57</sup> 담체 표면에 축적된 미생물을 protozoa<sup>16)</sup>나 mite<sup>58)</sup> 등을 이용하여 제거하는 방법도 연구되었으나, 이들 방법은 protozoa나 mite의 개체수를 적정 수준에서 유지 조절할 수 있는 방안이 없어 실제 현장 적용 가능성은 낮다. 미생물의 과다 성장을 제어할 방안으로 질소원 등의 영양물질 공급량을 조절할 수도 있으나,<sup>59</sup> 이 방법은 악취 및 VOCs 제거에 필요한 영양물질 요구량을 정확히 파악하고 영양물질 농도를 항상 모니터링 하여야 하는 단점이 있다.

또한 담체의 수분함량과 pH 등의 운전조건이 정상범위를 벗어나면 생물여과 미생물반응기의 전체 효율이 감소한다. 퇴비를 담체로 이용하는 바이오필터의 경우 수분함량이 30% 이하로 떨어지면 처리효율이 급격히 감소한다고 알려져 있다.<sup>37,60)</sup>

실제로 유입가스의 상대습도가 100% 이하로 유지되면 바이오필터 담체로부터 수분이 지속적으로 증발되어 사라지며, 적절한 수분 공급이 이루어지지 않으면 담체의 수분함량이 감소하여 미생물 반응이 저해되는 현상이 나타날 수 있다. 최근에는 담체 내부의 수분함량을 자동적으로 측정하여 수분에 의한 처리효율 감소를 최소화할 수 있는 자동화 장치가 개발 보급되고 있다.

#### 4. 미생물반응기 연구개발 방향

생물여과 미생물반응기는 최근의 활발한 연구개발 노력으로 초창기 토양탈취법에 비해 상당한 개선과 발전을 이루었으며, 적용범위도 비약적으로 확대되었다.<sup>61)</sup> 그러나 난분해성 물질에 대한 낮은 분해능과 운전과정에서 나타나는 불안정한 운전효율은 아직 해결해야할 과제로 남아있다. 최근에는 이런 한계를 극복하기 위한 다양한 기술 개발 활동이 전세계적으로 진행되고 있으며, 가시적인 연구 성과가 나타나고 있다.

##### 4.1. 유입부하완충 및 전처리

미생물 반응의 특성상 오염물질의 유입부하량이 일정하게 유지될 때 가장 안정적인 처리효율을 얻을 수 있다. 그러나 대부분의 오염물질 배출원에서는 악취가스의 농도와 유량이 시간대별로 크게 변화한다. 유입부하량이 급변한 후에는 미생물반응기의 제거효율이 불안정해지기 쉬우며, 일정 수준의 분해능을 회복하는데 장시간이 소요된다.<sup>62)</sup> 따라서 유입부하량 변화가 큰 경우에는 활성탄 같은 수착성(sorptive) 물질로 구성된 부하완충장치(load equalizer)를 미생물반응기 전단에 설치하여 유입 악취가스의 변동에 따른 불안정한 처리효율 문제를 개선할 수 있다.<sup>63)</sup>

활성탄 흡착이외의 다른 물리화학적 처리방법을 미생물반응기의 전처리로 도입하기 위한 시도도 진행되고 있다.<sup>2)</sup> 특히 난분해성 물질을 처리하는 경우에 미생물 반응만으로는 요구되는 제거효율을 안정적으로 얻기 어렵고 미생물반응기의 적용타당성도 떨어진다. 따라서 자외선 광분해(UV photolysis) 반응을 전처리 공정으로 도입하여 난분해성 물질을 부분 산화시킨 후 후속 미생물반응기에서 최종 제거하는 통합공정이 연구되고 있다.<sup>64)</sup> 자외선 이외에도 오존이나 플라즈마 등의 고도산화(advanced oxidation) 공법을 미생물반응기의 전처리 기술로 사용하여 미생물의 생분해 능력을 극대화시키는 통합공정도 적용 가능하다.<sup>2)</sup>

##### 4.2. 담체 개량

생물여과 공정의 담체는 퇴비나 토탄 등의 천연물질에서 플라스틱, 세라믹, 폴리우레탄 등의 인공물질로 개량되어 왔다. 최근에는 인공 담체의 성능을 더욱 개선한 새로운 복합기능성 담체들이 개발되어 생물여과 반응기의 분해능을 향상시키고 있다.<sup>2,3)</sup> 또한 담체에 미생물이 부착 성장하기 유리한 구조적·화학적 특성을 부여하여 미생물의 활성도를 항상 높게 유지하도록 하는 방안도 제시되고 있다.

전통적인 담체 대신에 분리막(membrane)을 이용하여 기체상과 미생물막의 접촉면적을 늘리고 물질전달율을 향상시켜 전체 처리효율을 향상시키는 연구도 진행되고 있다.<sup>2,3)</sup> 평막(flat sheet membrane)<sup>65)</sup> 또는 증공사막(hollow fiber membrane)<sup>66~68)</sup>의 한쪽 면에는 오염기체를 통과시키고 다른 면에는 미생물막을 형성시켜 물질전달율과 생분해율을 비약적으로 증가시킬 수 있다. 그러나 분리막에 오염기체가 통과하면서 발생하는 막간차압(trans-membrane pressure)을 최소화할 수 있도록 분리막 재질이나 공극크기(pore size)를 변화시켜야 하는 문제점이 나타나고 있어 이에 대한 해결방안이 요구된다.

#### 4.3. 다양한 미생물 적용

악취 및 VOCs 분해능이 높은 미생물을 선별하여 미생물 반응기의 제거효율을 증가시키기 위한 연구도 활발하게 진행되고 있다. 곰팡이(fungi)류는 균사체(hypha)로 구성되어 있어 오염기체와 접촉면이 넓고 단위부피당 오염물질 분해능 높아 미생물반응기에서 일반적으로 사용되는 세균(bacteria)보다 월등히 뛰어난 제거효율을 나타낸다.<sup>69,70)</sup> 그러나 아직까지는 곰팡이의 VOCs 분해 기작이 구체적으로 밝혀져 있지 않으며, 균사체 및 곰팡이 성장속도에 대한 정보가 적어 곰팡이를 적정 수준에서 제어하는데 문제가 발생한다.

고온 세균(thermophilic bacteria)을 이용한 미생물반응기 연구도 다각도로 진행되고 있다.<sup>43,71)</sup> 실제 산업현장에서 배출되는 가스의 온도가 높게 유지되는 경우가 많으며, 따라서 기존 미생물반응기를 이용하기 위해서는 냉각탑을 전단에 설치하여 가스 온도를 적정 수준으로 낮춰주어야만 한다. 이런 문제점을 해결하기 위하여 50°C 이상의 고온에서도 악취 및 VOCs 제거효율을 나타내는 고온성 미생물을 분리하여 적용할 수 있다.<sup>43)</sup> 이외에도 새로운 미생물을 선별 적용하여 악취 및 VOCs 제거효율을 향상시키기 위한 노력은 다양한 방법을 통해 지속적으로 진행될 것으로 예상된다.

#### 4.4. 새로운 미생물반응기 도입

새로운 담체를 개발하거나 활성미생물을 적용하여 생물여과 미생물반응기의 악취 및 VOCs 분해능이 크게 향상되기는 하였으나, 담체충전형 기술의 한계는 여전히 존재한다. 따라서 충전형 생물여과법 대신 새로운 반응기 형태를 도입하려는 연구개발 노력도 함께 진행되고 있다.<sup>2,3)</sup> 담체 표면에 부착 성장하는 미생물막을 사용하지 않고 활성슬러지 방식의 부유미생물을 악취 및 VOCs 처리에 적용할 수 있다. 이 경우 액상에 특수한 유기용매를 첨가하여 오염물질의 용해도가 크게 증가시킬 수 있으며, 이에 따라 악취 및 VOCs 생분해율도 향상된다.<sup>72)</sup> 또 다른 처리효율 향상방안으로 계면활성제 거품을 이용하는 연구도 진행되고 있다.<sup>73)</sup> 계면활성제 거품은 오염물질의 용해도를 높이며 물질전달에 필요한 넓은 표면적을 형성할 수 있어 악취 및 VOCs 제거효율을 높일 수 있다. 이들 신기술들은 담체충전형 미생물반응기의 보완 기술로 발전가능성이 매우 높다고 판단된다.

## 5. 결론

악취 및 VOCs 저감기술인 생물여과 미생물반응기는 1970년대 이후부터 유럽 선진국을 중심으로 하수처리장이나 퇴비화 시설에 설치 운영되고 있으며, 30년 이상의 현장 실증 경험과 연구개발 성과에 힘입어 저농도 악취 및 VOCs에 대한 최적방지기술로 분류되고 있다. 국내에도 하수처리장 등의 환경기초시설에서 발생하는 악취 저감기술로 바이오필터 형태의 미생물반응기가 도입 운영되고 있으며, 설치 건수도 증가하고 있다. 특히 악취방지법이 시행되고 민원이 증가하면서 미생물반응기에 대한 관심과 시장규모도 확대되고 있는 추세이다.

초기 충전담체형 생물여과 반응기는 퇴비 같은 천연유기물을 담체로 이용하였으며, 유지 관리비용이 적고 2차오염발생이 적다는 장점이 있어 활발히 적용되었다. 이후 담체 특성을 보완하고, 최적 미생물을 선별 적용하였으며, 운전조건을 개선하여 악취 및 VOCs 분해능과 운전효율이 지속적으로 향상되었다. 특히 생물여과 미생물반응기를 장기간 연속 운전할 때 나타나는 영양염류 결핍, 압력손실 증가, 폐색 등의 문제점들에 대한 해결방안이 제시되어 현장에 적용되고 있다.

그러나 미생물반응기 기술은 아직 고농도 난분해성 물질에 대한 적용타당성이 떨어지며, 부하 변동이 큰 경우에 운전효율이 불안정해지는 문제점 등이 해결해야 할 과제로 남아있다. 최근 이런 한계를 극복하기 위한 다양한 연구개발 활동이 진행되고 있다. 물리화학적 처리기술과 생물여과법을 융합한 새로운 반응기 기술이나, 분리막 미생물반응기, 곰팡이균을 이용한 바이오필터, 계면활성제 미생물반응기 등의 새로운 시도들은 생물학적 악취 및 VOCs 저감기술의 적용범위를 앞으로 더욱 확대시킬 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. van Groenestijin, J. W. and Hesselink, P. G. M., "Biotechniques for air pollution control," *Biodegradation*, **4**, 283~301(1993).
2. Devigny, J. S., Deshusses, M. A., and Webster, T. S., "Biofiltration for Air Pollution Control," CRC-Lewis Publishers(1999).
3. Shareefdeen, Z. and Singh, A., "Biotechnology for odor and air pollution control," Springer(2005).
4. van Lith, C., Leson, G., and Michelson, R., "Evaluating design options for biofilters," *J. Air Waste Manage. Assoc.*, **47**, 37~48(1997).
5. Song, J. and Kinney, K. A., "Effect of Vapor-Phase Bioreactor Operation on Biomass Accumulation, Distribution, and Activity," *Biotechnol. Bioeng.*, **68**, 508~516(2000).
6. Kinney, K. A., Loehr, R. C., and Corsi, R. L., "Vapor-phase bioreactors: avoiding problems through better de-

- ...W sign and operation," *Environ. Progress*, **18**, 222~230(1999).
7. Webster, T. S., Cox, H. H. J., and Deshusses, M. A., "Resolving operational and performance problems encountered in the use of a pilot/full scale biotrickling filter reactor," *Environ. Prog.*, **18**, 162~172(1999).
8. Iranpour, R., Cox, H. H. J., Deshusses, M. A., and Schroeder, E. D., "Literature review of air pollution control biofilters and biotrickling filters for odor and volatile organic compound removal," *Environ. Prog.*, **24**, 254~267(2005).
9. Wright, W. F., Schroeder, E. D., Chang, D. P. Y., and Romstad, K., "Performance of a compost biofilter treating gasoline," *J. Environ. Eng.*, **123**, 547~555(1997).
10. Kim, B. R., Adams, J. A., Klaver, P. R., Kalis, E. M., Contrera, M., Griffin, M., Davidson, J., and Pastick, T., "Biological removal of gaseous VOCs from automotive painting operations," *J. Environ. Eng.*, **126**, 745~753(2000).
11. Arnold, M., Reittu, A., von Wright, A., Martikainen, P. J., and Suihko, M.-L., "Bacterial degradation of styrene in waste gases using a peat filter," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **48**, 738~744(1997).
12. Auria, R., Aycaguer, A.-C., and Devigny, J. S., "Influence of water content on degradation rates for ethanol in biofiltration," *J. Air Waste Manage. Assoc.*, **48**, 65~70(1998).
13. Jorio, H., Kiared, K., Brzezinski, R., Leroux, A., Viel, G., and Heitz, M., "Treatment of air polluted with high concentrations of toluene and xylene in a pilot-scale biofilter," *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, **73**, 183~196(1998).
14. Morgenroth, E., Schroeder, E. D., Chang, D. P. Y., and Scow, K. M., "Nutrient limitation in a compost biofilter degrading hexane," *J. Air Waste Manage. Assoc.*, **46**, 300~308(1996).
15. Shareefdeen, Z. and Baltzis, B. C., "Biofiltration of toluene vapor under steady-state and transient conditions: theory and experimental results," *Chem. Eng. Sci.*, **49**, 4347~4360(1994).
16. Cox, H. H. J. and Deshusses, M. A., "Biomass control in waste air biotrickling filters by protozoan predation," *Biotechnol. Bioeng.*, **62**, 216~224(1999).
17. Kirchner, K., Schlachter, U., and Rehm, H.-J., "Biological purification of exhaust air using fixed bacterial monocultures," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **31**, 629~632(1989).
18. Lu, C., Lin, M.-R., and Chu, C., "Temperature effects of trickle-bed biofilter for treating BTEX vapors," *J. Environ. Eng.*, **125**, 775~779(1999).
19. Ergas, S. J., Kinney, K., Fuller, M. E., and Scow, K. M., "Characterization of a compost biofiltration system degrading dichloromethane," *Biotechnol. Bioeng.*, **44**, 1048~1054(1994).
20. Sukesan, S. and Watwood, M. E., "Continuous vapor-phase trichloroethylene biofiltration using hydrocarbon-enriched compost as filtration matrix," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **48**, 671~676(1997).
21. Baltzis, B. and Mpanias, C. J., "Removal of chlorinated VOCs in biotrickling filter," *Proceedings 1998 USC-TRG Conference on Biofiltration*, 115~116(1998).
22. Diks, R. M. M. and Ottengraf, S. P. P., "Verification studies of a simplified model for the removal of dichloromethane from waste gases using a biological trickling filter," *Bioprocess Eng.*, **6**, 131~140(1991).
23. Chou, M.-S. and Shiu, W.-Z., "Bioconversion of methylamine in biofilters," *J. Air Waste Manage. Assoc.*, **47**, 58~65(1997).
24. Liang, Y., Quan, X., Chen, J., Chung, J. S., Sung, J. Y., Chen, S., Xue, D., and Zhao, Y., "Longterm results of ammonia removal and transformation by biofiltration," *J. Hazard. Mat.*, **B80**, 259~269(2000).
25. Smet, E., van Langenhove, H., and Verstraete, W., "Isobutyraldehyde as a competitor of the dimethylsulfide degrading activity in biofilters," *Biodegradation*, **8**, 53~59(1997).
26. Tang, H.-M., Hwang, S.-J., and Hwang, S.-C., "Waste gas treatment in biofilters," *J. Air Waste Manage. Assoc.*, **46**, 349~354(1996).
27. Chung, Y.-C., Huang, C., Tseng, C.-P., and Pan, J.R., "Biotreatment of H<sub>2</sub>S and NH<sub>3</sub>-containing waste gases by co-immobilized cells biofilter," *Chemosphere*, **41**, 329~336(2000).
28. Oh, Y. S. and Bartha, R., "Removal of nitrobenzene vapors by a trickling air biofilter," *J. Ind. Microbiol.*, **18**, 293~296(1997).
29. Deshusses, M. A. and Johnson, C. T., "Development and validation of a simple protocol to rapidly determine the performance of biofilters for VOC treatment," *Environ. Sci. Technol.*, **34**, 461~467(2000).
30. Barton, J. W., Zhang, X. S., Klasson, K. T., and Davidson, B. H., *Proceedings of the 91st Annual Meeting and Exhibition Air & Waste Management Association*; Paper 98-WAA.13P(1998).
31. Deshusses, M. A., Hamer, G., and Dunn, I., "Behavior of Biofilters for Waste Air Biotreatment," *Environ. Sci. Technol.*, **29**, 1059~1068(1995).
32. Chou, M. S. and Huang, J. J., "Treatment of methyl ethyl ketone in air stream by biotrickling filters," *J. Environ. Eng.*, **123**, 569~576(1997).
33. Tang, H.-M., Hwang, S.-J., and Wang, W.-C., "Degradation

44. of acetone in a biofilter," *Environ. Eng. Sci.*, **14**, 219~226(1997).
34. Deshusses, M. A., Johnson, C. A., and Leson, G. L., "Biofiltration of High Loads of Ethyl Acetate in the Presence of Toluene," *J. Air Waste Manage. Assoc.*, **49**, 2383~2391(1999).
35. Ottengraf, S. P. F. and van den Oever, A. H. G., "Kinetics of organic compound removal from waste gases with a biological filter," *Biotechnol. Bioeng.*, **25**, 3089~3102(1983).
36. Shareefdeen, Z., Baltzis, B. C., Oh, Y. S., and Bartha, R., "Biofiltration of methanol vapor," *Biotechnol. Bioeng.*, **41**, 512~524(1993).
37. Auria, R., Aycaguer, A. C., and Devigny, J. S., "Influence of water content on degradation rates for ethanol in biofiltration," *J. Air Waste Manage. Assoc.*, **48**, 65~70(1998).
38. Hodge, D. S. and Devigny, J. S., "Biofilter treatment of ethanol vapors," *Environ. Prog.*, **13**, 167~173(1994).
39. Kim, J. O. and Lee, W. B., "Biodegradation of gaseous benzene with microbial consortium in a biofilter," *Environ. Technol.*, **23**, 437~444(2002).
40. Kwon, H.-H., Lee, E. Y., Cho, K.-S., and Ryu, H. W., "Benzene biodegradation using the polyurethane biofilter immobilized with *Stenotrophomonas maltophilia* T3-c," *J. Microbiol. Biotechnol.*, **13**, 70~76(2003).
41. Zilli, M., Daffonchio, D., Di Felice, R., Giordani, M., and Converti, A., "Treatment of benzene-contaminated airstreams in laboratory-scale biofilters packed with raw and sieved sugarcane bagasse and with peat," *Biodegradation*, **15**, 87~96(2004).
42. du Plessis, C. A., Strauss, J. M., and Riedel, K. H. J., "BTEX catabolism interactions in a toluene-acclimatized biofilter," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **55**, 122~128(2001).
43. Strauss, J. M., Riedel, K. J., and du Plessis, C. A., "Mesophilic and thermophilic BTEX substrate interactions for a toluene-acclimatized biofilter," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **64**, 855~861(2004).
44. Wu, D., Quan, X., Zhao, Y., and Chen, S., "Removal of p-xylene from an air stream in a hybrid biofilter," *J. Haz. Mat.*, **136**, 288~295(2006).
45. Lu, C., Lin, M. R., and Lin, J., "Removal of Styrene Vapor from Waste Gases by a Trickle-Bed Air Biofilter," *J. Hazard. Materials*, **82**, 233~245(2001).
46. Sorial, G. A., Smith, F. L., Suidan, M. T., Pandit, A., Biswas, P., and Brenner, R. C., "Evaluation of trickle-bed air biofilter performance for styrene removal," *Water Res.*, **32**, 1593~1603(1998).
47. Cox, H. H. J., Moerman, R. E., van Baalen, S., van Heiningen, W. N. M., Dodema, H., and Harder, W., "Performance of a styrene-degrading biofilter containing the yeast *Exophiala jeanselmei*," *Biotechnol. Bioeng.*, **53**, 259~266(1997).
48. Jang, J. H., Hirai, M., and Shoda, M., "Styrene degradation by *Pseudomonas* sp. SR-5 in biofilters with organic and inorganic packing materials," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **65**, 349~355(2004).
49. Oh, Y.-S. and Choi, S.-C., "Selection of suitable packing material for biofiltration of toluene, m- and p-xylene vapors," *J. Microbiol.*, **38**, 31~35(2000).
50. Xi, J. Y., Hu, H. Y., Zhu, H. B., and Qian, Y., "Effects of adding inert spheres into the filter bed on the performance of biofilters for gaseous toluene removal," *Biochem. Eng. J.*, **23**, 123~130(2004).
51. Moe, W. M. and Irvine, R. L., "Polyurethane foam for use in biofiltration; Part II: Operation and Performance," *J. Environ. Eng.*, **126**, 826~832(2000).
52. Song, J., Ramirez, J., and Kinney, K. A., "Nitrogen utilization in a vapor-phase biofilter," *Water Res.*, **37**, 4497~4505(2003).
53. Gribbins, M. J. and Loehr, R. C., "Effect of media nitrogen concentration on biofilter performance," *J. Air Waste Manage. Assoc.*, **48**, 216~226(1998).
54. Corsi, R. L. and Seed, L., "Biofiltration: media, substrate, and loadings effects," *Environ. Prog.*, **14**, 151~158(1995).
55. Smith, F. L., Sorial, G. A., Suidan, M. T., Breen, A. W., and Biswas, P., "Development of two biomass control strategies for extended, stable operation of highly efficient biofilters with high toluene loadings," *Environ. Sci. Technol.*, **30**, 1744~1751(1996).
56. Cox, H. H. J. and Deshusses, M. A., "Chemical removal of biomass from waste air biotrickling filters: screening of chemicals of potential interest," *Water Res.*, **33**, 2383~2391(1999).
57. Laurenzis, A., Heits, H., Wubker, S.-M., Heinze, U., Friedrich, C., and Werner, U., "Continuous biological waste gas treatment in stirred trickle-bed reactor with discontinuous removal of biomass," *Biotechnol. Bioeng.*, **57**, 497~503(1998).
58. Woertz, J. R., van Heiningen, W. N. M., van Eekert, M. H. A., Kraakman, N. J. R., Kinney, K. A., and van Groenestijn, J. W., "Dynamic bioreactor operation: effects of packing material and mite predation on toluene removal from off-gas," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **58**, 690~694(2002).
59. Holubar, P., Andorfer, C., and Braun R., "Effects of nitrogen limitation on biofilm formation in a hydrocarbon-

- degrading trickle-bed filter," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **51**, 536~540(1999).
60. Gostomski, P. A., Sisson, J. B., and Cherry, R. S., "Water Content Dynamics in Biofiltration: The Role of Humidity and Microbial Heat Generation," *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, **47**, 936~944(1997).
61. van Groenestijn, J. W. and Jraakman, N. J. R., "Recent developments in biological waste gas purification in Europe," *Chem Eng. J.*, **113**, 85~91(2005).
62. Martin, F. J. and Loehr, R. C., "Effect of periods of non-use on biofilter performance," *J. Air Waste Manage. Assoc.*, **46**, 539~546(1996).
63. Moe, W. M. and Li, C., "A design methodology for activated carbon load equalization systems applied to biofilters treating intermittent toluene loading," *Chem. Eng. J.*, **113**, 175~185(2005).
64. Mohseni, M. and Zhao, J. L., "Coupling ultraviolet photolysis and biofiltration for enhanced degradation of aromatic air pollutants," *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, **81**, 146~151(2006).
65. Reji, M. W., de Gooijer, K. D., de Bont, J. A. M., and Hartmans, S., "Membrane bioreactor with porous hydrophobic membrane as a gas-liquid contactor for waste gas treatment," *Biotechnol. Bioeng.*, **68**, 548~556(2000).
66. Ergas, S. J., Shumway, L., Fitch, M. W., and Neemann, J.J., "Membrane process for biological treatment of contaminated gas streams," *Biotechnol. Bioeng.*, **63**, 431~441(1999).
67. Kim, D. and Kim, H., "Degradation of toluene in a hydrophobic polyethylene hollow fiber membrane bioreactor with *Pseudomonas putida*," *Proc. Biochem.*, **40**, 2015~2020(2005).
68. van Langenhove, H., Bo, I.D., Jacobs, P., Demeestere, K., and Dewulf, J., "A membrane bioreactor for the removal of dimethyl sulphide and toluene from waste air," *Water Sci. Technol.*, **50**, 215~224(2004).
69. Woertz, J. R., Kinney, K. A., McIntosh, N. D. P., and Szaniszló, P. J., "Removal of toluene in a vapor-phase bioreactor containing a strain of the dimorphic black yeast *Exophiala lecanii-corni*," *Biotechnol. Bioeng.*, **75**, 550~558(2001).
70. Kennes, C. and Veiga, M. C., "Fungal biocatalysts in the biofiltration of VOC-polluted air," *J. Biotechnol.*, **113**, 305~319(2004).
71. Heslinga, D. C. and van Groenestijn, J. W., "Thermophilic biological waste gas cleaning," Proceedings of an International Symposium on Biological Waste Gas Cleaning, Maastricht(1997).
72. Davidson, C. T. and Daugulis, A. J., "Addressing biofilter limitations: A two-phase partitioning bioreactor process for the treatment of benzene and toluene contaminated gas streams," *Biodegradation*, **14**, 415~421(2003).
73. Kang, E. and Deshusses, M. A., "Development of foamed emulsion bioreactor for air pollution control," *Biotechnol. Bioeng.*, **84**, 240~244(2003).