



# VOC 및 악취제거를 위한 Biofilter 기술

LG환경안전연구원

권성현 / 1997 USC 환경공학과 박사  
권대용 / 1995 연세대학교 토목공학과 석사

## 1. 서론

최근 성층권 오존층 파괴와 함께 도시를 중심으로 발생하는 광화학대기오염이 심각한 환경 문제로 대두되고 있다. 광화학대기오염의 원인물질중의 하나인 VOC는 대기중 이동성이 강하고 악취를 유발할 뿐 아니라, 마취성이 강하다. 또한, 신경계에 독성물질로 작용하며, 벤젠, PAHs 등의 물질은 발암성을 가지고 있어 환경보건상 유해하기 때문에 VOC감축과 제어를 대기질 관리의 주요정책수단으로 설정하는 국가가 증가하는 추세이다. 한편, VOC와 함께 각종 산업체, 하수, 농축산 폐수, 분뇨처리장등에서 발생하는 악취가스로 인해 공장, 각종 처리장 주변에 인접한 지역에서의 민원이 증가하고 있다.

이에 환경부에서는 1995년 12월 개정된 대기환경보전법에서 '휘발성 유기화합물질의 규제' 규정을 신설하였으며, 이에 따른 시행령 및 시행규칙을 제정하여, 1999년 1월 1일부터 주요 배출원 별로 단계적으로 VOC에 대한 관리 및 규제를 시행하게 되었다. 특히 96년에는 여천국가산업공단지역에서 VOC 등에 의한 대기오염이 사회적 문제로 대두됨에 따라 동 지역을 대기보존 특별대책지역으로 지정 하고, VOCs를 배출하는 기존시설에 대해서는 VOC의 배출을 억제, 방지하기 위한 시설의 설치 및 관리에 관한 기준을 준수하

도록 하며, 신·증설 시설에 대해서는 VOC의 배출을 억제, 방지하기 위한 시설의 설치 및 관리에 관한 기준 뿐만 아니라 추가로 최적방지시설 설치등의 설치기준을 준수하도록 하였다. 97년 7월에는 서울 인천 등 수도권내의 17개시를 대기환경규제지역으로 지정, 고시하여 VOC와 악취를 포함하는 대기 오염에 대하여 2000년 12월 31일까지 방지시설 설치 등의 조치를 취하도록 하고 있으며 울산, 미포 및 온산국가산업공단지역에 대해서도 VOC 배출 저감을 위한 종합대책을 세워 관리하게 하였다. 동시에 94년 1월부터 악취를 대기오염물질로 규정함과 동시에 악취물질의 분석방법의 도입, 규제기준의 설정 등 악취제어에 대한 제도적 장치를 강화하고 있어, 악취 물질의 측정 및 제거에 대한 보다 적극적인 대처가 요구되고 있다.

이러한 VOC 와 악취제거를 위한 기술들 중에서 미생물이용 대기오염제거기술이 구미선진국을 중심으로 사용되고 있는 경우가 국내에 많이 소개됨에 따라 Biofilter기술에 관한 국내의 관심이 높아지고 있다.

미생물을 이용한 VOC, 악취제거기술은 1920년대 하수처리장에서 발생 하는 H<sub>2</sub>S를 처리할 수 있다는 것이 알려지면서 1957년 미국에서 특허화 되었다. 이후 유럽, 특히 독일과 네덜란드를 중심으로 발전하여 토양층의 넓은 소요면적을 줄이기위해 유기담체가 응용되기 시작하면서 현재 구미 각 국에 널리 보급되었으며 유럽



에서는 현재 BACT(Best Available Control Technology)로 인정받고 있다. 미국에서는 1970년대 관계법규가 제정되어 현재 활발한 연구, 상용화가 진행되고 있다. 이 기술은 경쟁기술에 비하여 시설투자 및 유지관리비가 매우 저렴하여, 대유량 저농도 폐가스를 방출하는 다양한 적용처에 광범위하게 응용되고 있다.

본 논문에서는 이때까지의 Biofilter에 관한 연구자료들을 중심으로 Biofilter 기술에 관한 간략한 소개를 하고자 한다.

## 2. Biofilter의 기본원리

Biofilter의 기본 원리는 대개의 생물막 공정과 유사하게 3단계 기본 과정으로 제거된다. 첫째, 기체상의 화학물질(VOC)이 공기와 함께 공극공간을 흐르다가 여재표면에 형성된 액상생물막까지이른다. 둘째, 순양된 미생물들로 구성된 생물막속으로 확산된다. 셋째, 미생물들이 그 화학물질을 주기질로 산화하여 에너지를 얻거나 효소반응으로 cometabolize시킨다. 동시에 산소, 인, 질소등이 유용한 형태로 같이 확산되어 같이 공급된다. 기질, 전자수용체와 영양염류의 생물막내에서의 지순적이 수단은 늦다구배를 형성시키구 환산저택의

구동력을 제공한다. 이 과정에서 처리목표물질은 CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, 무기염, Biomass등으로 전환된다. 다음 그림은 간단한 Pore space schematic을 나타낸다.

Ottengraf등에 의하면 이 반응의 동역학은 임계농도를 기준으로 1차 반응과 0차 반응으로 구별될 수 있으며 각각의 경우에 따라 확산제한과 반응제한의 지배를 받게 된다고 알려져있다. Biofilter의 설계는 1차반응인 경우를 주로 상정하며 vertical concentration profile을 구하여 적절한 여재깊이를 계산할 수 있다.

현재까지 Biofilter는 다양한 물질의 제거에 사용되었고, 다음은 지금까지 Biofilter로 제거가능 하다고 확인된 물질목록의 일부이다. Ammonia, Carbon monoxide, Hydrogen Sulfide, Acetone, Benzene, Butanol, Butyl Acetate, Diethyl amine, Dimethyl disulfide, Ethanol, Hexane, Ethylbenzene, Buthylaldehyde, Acetate, Scatole, Indole, Methanole, Methyl-ethyl-ketone, Styrene, Iso-propanole, Nitrogen Oxide, 2-Ethyl hexanol, Xylene, TCE, PCE, Methyl mercaptan, Mono-, Di-, Tri-Chloromethane, Methane, Nitrogen dioxide, Pentane, Dimethyl Sulfide, Thiophene, Toluene, (Warren et al. 1997) Biofilter로 제거되는 대부분의 물질은 VOC 혹은 환원된 황 혹은 질소화합물들이다. 제거하고자하는 Target compound는 액상 생물막으로 전달되어야하는데, 따라서 이론적으로 휘발성이 크거나 용해도가 낮은 화합물들은 낮은 제거율을 나타낼 것이라고 생각되어지나 실제로는 그러한 물질들도 Biofilter로 잘 제거된 경우가 많이 보고되고 있다. 결국 어떤 물질의 분리특성이 그 물질의 Biofilter 처리가능 여부를 결정하지는 못한다고 할 수 있다.

그러나 화합물의 독성여부나 생분해성은 Biofilter처리가능여부를 결정짓는 중요한 요소이다. Alcohols, ethers, aldehydes, ketones, monocyclic aromatics, sulfides등은 적절한 농도에서 Biofilter로

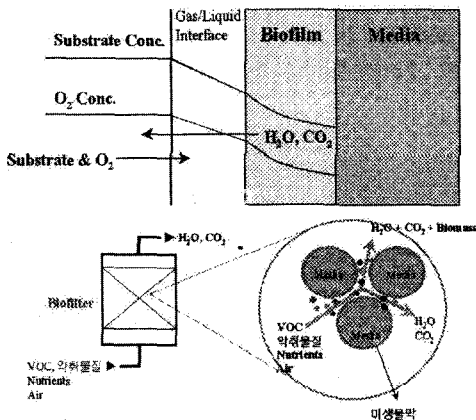


그림 1. Pore space schematic diagram



잘 제거된다고 보고된 물질들이다. 일반적으로 생물학적으로 제거가 가능하다고 보고된 물질들은 대부분 Biofilter로도 제거가 잘 되며 생분해성이 낮다고 알려진 할로젠족 화합물들은 느리게 반응이 진행되거나 별도의 cometabolite가 필요하다고 알려져 있다. 예를 들면 Dichloromethane는 toluene이 함께 있을 경우, 98% 제거되었고(Ergas et al. 1993) TCE는 propane과 같은 cometabolite와 함께 있을 때 제거되었다. ( Corsi et al. 1994 ) Biofilter는 다양한 chemical을 대상으로 적용되고있으며 이 경우 물질전달과 생분해에 있어서 chemical들 사이의 경쟁효과 때문에 inhibition이 발생하는 경우도 있다. 이러한 복잡성에 의하여 혼합물의 제거율을 얻고자 할 때에는 경우마다 treatability test를 필요로 한다.

### 3. Biofilter 운전 변수

Biofilter장치의 간단한 schematic diagram은 다음과 같다.

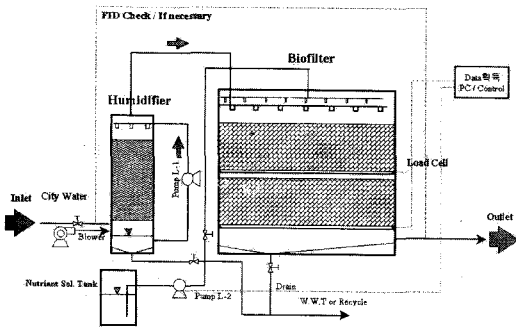


그림 2. Biofilter Schematic Diagram

Biofilter는 크게 Humidifier와 Biofilter본체, 살수장치등으로 구성되고 경우에 따라 nutrient tank와 부속 pump를 필요로 한다. 상용화 되어있는 Biofilter의 경우 여재의 water content를 조절하기위해 load cell과

direct irrigation pump를 pc로 제어하는 별도장비를 부속시키기도 한다. 처리하고자 하는 Inlet gas는 Humidifier를 통해 상대습도 95%이상으로 가습되어 Biofilter로 유입된다. 유입방향은 Upstream 혹은 Down stream 두 가지 방식이 있으나 Nutrient solution을 direct irrigation할 경우, 영양 염류와 기질이 같은 방향으로 공급되도록 하기 위해 down stream을 사용하는 경우가 많다. 반응기는 bed의 층수에 따라 single layer, multi layer로, 반응기 개방여부에 따라open reactor와 closed reactor로, 유입시키는 방식에 따라step-feed, modular reactor등으로 나눌 수 있다. 각각의 반응기는 고유의 장단점을 갖는다.

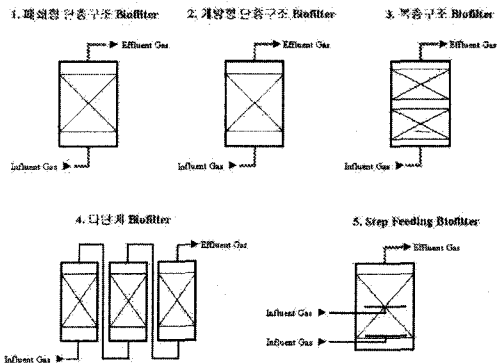


그림 3. Biofilter Reactor Types

다음은 Biofilter를 운전함에 있어서 고려해야 할 변수들이다. 간단하게 표로 정리하면 다음과 같다.

표1. Biofilter운전변수

변수명	원명	계산식	단위	사용범위	References
Empty Bed Contact Time EBCT	Gas residence time	V/Q	Sec, Min	15 ~ 60	Warren et al. (1997)
Surface Loading	Volumetric Gas Loading	Q/A	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .h	50 ~ 200	
Mass Loading	Chemical mass loading rate per unit bed volume	QC/A	g/m <sup>3</sup> .h	10 ~ 100	
Elimination Capacity	Chemical mass removal rate per unit bed volume	Q(C <sub>i</sub> -C <sub>e</sub> )/V	g/m <sup>3</sup> .h	10 ~ 100	
Removal Efficiency	Performance Measure	100 * (C <sub>i</sub> -C <sub>e</sub> )/C <sub>i</sub>	%	85 ~ 99	

### Empty Bed Contact Time (EBCT)



Biofilter 여재 내부에서 기체흐름이 체류하는 시간을 말한다. EBCT를 공기 공극률로 나눈 것을 actual EBCT로 쓰는 경우도 있다. gas phase, liquid phase, adsorbed phase사이의 분리때문에 기질체류 시간이 기체체류시간보다 더 크지만 EBCT에는 비례한다. Inlet gas의 성상과 분해도에 의해 반응기 크기를 결정할때 EBCT는 가장 결정적인 설계인자중의 하나이다.

**표면부하**

Biofilter에 대한 부피부하율이다. m/h로 표시하는 경우가 많기 때문에 면속도라고도 한다.

Surface loading 이 크다는 것은 그만큼 짧은 EBCT와 빠른 유속을 의미한다. 기체유속이 빠를 경우, 여재 표면 건조의 문제도 있기 때문에 최대표면부하는 200m/h정도로 제한된다.(sabo et.al 1993)

**질량부하**

단위시간, 단위체적에 대한 VOC 질량부하율이다. 동일한 질량부하라도 농도와 유량의 조합에 따라 상이한 양상을 보일 수 있다. 질량부하가 클수록 제거율은 좋아이지만 처리농도도 같이 증가하며 이에 따라서 원하는 처리농도를 기준으로 질량부하량을 설정한다.

**제거능**

주어진 질량부하에 있어서 단위시간, 단위체적에 대한 VOC 질량제거율이다. 질량부하와 마찬가지로 전체 Bed에 대한 평균적인 값을 의미하며 적절한 수준에서의 제거율이 달성되면 제거능은 운전비용을 결정하며 특히 동일물질을 동일조건에서 운전하는 경우 Biofilter의 성능을 비교하고자 할 때 사용할 수 있는 값이다. 합리적으로 설계하는 경우에는 정해진 처리농도 기준을 만족하는 최대제거능에서 Vertical Concentration Profile에서 소요여재깊이를 구한다.

몇몇 자료들에서 요약한 최대제거능은 다음과 같다.

표2. Published Elimination Capacities for Various Biofilter Studies

References	Biofilter Medium	Pollutants	Max. Elimination Capacity
Apel et al. 1992	Compost	Gasoline Vapor	1220
Done et al. 1984	Compost	Toluene	100
Done 1985	Compost	Aldehydes	40
Oh et al. 1993a	Peat Moss and Perlite	BTEX, Chlorobenzene	15 to 200
Oh et al. 1993b	Peat Moss and Perlite	Methanol Butanol Methane Hexane Benzene Toluene BTEX	112.8 65.3 10.2 47.6 74.7 68.1 15.9
Ottengraf 1983	Compost	Toluene Butylacetate Ethylacetate	20 40 20
Ottengraf 1986	Compost	Waste gases from Composting plant	5.8
Saberiyan et al 1993	Spagnum Moss	Gasoline	143
Shattuck et al 1993	Peat Moss and Perlite	Methanol	112.8
VanLah 1989	Compost	Methylfolinate Methanol	500 18

**4. Design 및 운전시의 고려사항**

**4.1 여재선택**

Biofilter는 반응기 내부의 여재를 반드시 필요로 한다. 충전여재는 일부 흡착재의 역할을 수행하면서 동시에 미생물막이 표면에 형성되도록 한다. 밀도, gas균등 배분과 압력손실을 낮추기 위한 위한 구조, 유기물함량, 함수능, 미생물량, pH, 냄새, 가격 등은 중요한 여재 특성들이다. 미생물선택에 중요한 항목들을 간단히 서술하면 다음과 같다.

- 미생물 성장을 위한 적절한 환경 : 영양염류, 수분함량, pH, 유기 탄소량 등이 적절한 여재일 것
- 넓은 비표면적 : Biofilm면적을 극대화 할 수 있는 형상, 흡착능 등을 가질 것
- 구조적 우수성 : 장시간 사용에 따른 medium compaction에 따른 압력손실증가와 actual EBCT 감소를 방지할 수 있을 것
- 보습능 : 미생물활성화에 있어서 결정적이라고 할 수 있는 수분 보유능이 우수할 것.
- 높은 공극률 : 같은 EBCT에서 actual EBCT를 크게 할 수 있고 흐름저항을 최소화할 수 있을 것



- 낮은 밀도 : medium compaction의 가능성을 줄일 수 있어야 한다.

초기의 Biofilter는 여재로서 토양층을 사용하였다. 흔히 토양층 탈취상, 혹은 토양 탈취상이라고 불렸다. 가격이 싸고 토양미생물을 많이 보유하고 있는 장점이 있어 악취제거용으로 많이 활용되는 편이나 상대적으로 빈약한 통기성 때문에 다양한 적용에 사용되고 있지는 않다. Biofilter의 여재로는 Sphagnum moss, peat, marl, heather, treebark등이 많이 실험되었고, 실제로 많이 상용화되고 있다. 하수슬러지를 Biofilter 여재로 사용하는 시도가 있었지만 성공적이지 않았다. (Rands et al. 1981) 가장 성공적인 Biofilter여재는 yard waste compost이다. Compost는 ①저렴하고, ②다양한 종류의 미생물이 있으며 ③풍부한 영양염류를 제공하고 ④통기성이 우수하다는 장점이 있다. 게다가 상당히 우수한 흡착능까지 보유하고 있어서 Biofilter 여재로는 적격이라고 할 수 있으며 현재 Compost는 Biofilter에서 가장 많이 사용되고 있는 여재이다. 한편, 많은 Biofilter는 실제로 혼합여재를 사용하고 있는데, 주여재는 Compost를 많이 사용하고 있고, 다음의 목적으로 다양한 혼합물을 사용하고 있다.

표3. Biofilter에 사용하는 혼합재료

혼합재료	목적
Compost	주여재
Styrofoam balls	통기성 향상을 위해 사용되는 비활성 재료
PP balls	
Coarse bark	압력손실감소
Wood chips	
Heather branches	
Porous materials	Water content유지를 위해 사용한다.
Perlite	
Marl, Oyster shells	pH Control
Lime, CaCO <sub>3</sub>	
Activated Carbon	순간 고농도의 유입Gas 원충용
Bentonite	Compost의 증진속흡수

#### 4.2 Moisture

Biofilter의 중요한 오염물 제거기체가 미생물의 활동에 의존하기 때문에 필연적으로 Biofilter는 인위적인 수분 공급을 필요로 한다. 4075m<sup>3</sup>/day (2.83m<sup>3</sup>/min)의 gas를 처리하는데 190 liter/day의 물이 소모되었다는 연구결과가 있고 (Envirogen, 1992) 처리효율이 단위체적의 미생물량과 Water Content에 정비례한다는 연구결과도 있다. (Scot 1996) 그런 의미에서 Biofilter운전에 있어서 가장 중요한 단일 운전변수가 있다면 그것은 수분조절이라고 할 수 있다. (Marsh 1992) 이것에 따라 여재의 수분과 관련하여 발생할 수 있는 문제점은 두 가지 경우, 과잉수분, 수분 부족의 문제점들이 있다.

- 과잉수분의 경우, 다음의 문제점들이 발생할 수 있다.
- ① 공극공간이 물로 채워짐에 따라 압력손실이 증가하고, 낮은 actual EBCT로 인하여 처리능력이 저하된다.
  - ② 단위체적당 기액접촉이 감소함에 따라 산소전달이 저하된다.
  - ③ 부분적으로 혐기영역이 형성되어 제거성능을 저하시키고 냄새를 발생시킨다.
  - ④ Biofilter 여재에서 영양염류가 유실된다.
  - ⑤ 별도처리를 필요로 하는 산성 침출수가 발생할 수 있다. 수분부족의 경우에는 다음의 문제점이 발생할 수 있다.
- ① 미생물의 활동저하가 유발된다.
  - ② 여재수축과 Cracking이 발생하여, 결과적으로 Channeling이 형성되고 처리능력이 악화된다.
  - ③ 일단 한번 건조된 Biofilter표면은 일종의 소수성을 띠게되며 따라서 다시 충분한 수분을 공급하기가 어렵게 된다.
- 다양한 여재를 사용함에 따라 각각의 최적 water content가 있다고 할 수 있고, 가장 많이 사용되는 Compost의 경우, 적절한 Water content는 습윤무게의 40~60%로 보고되고 있다.



적절한 수분의 공급을 위해 2~3가지 방법이 사용되고 있다.

① Prehumidification

충진탑에서 gas흐름과 반대방향으로 물을 살수하여 필요한 수분을 공급하는 방법, 혹은 Influent line에 설치한 Venturi로 water를 feeding하여 inlet gas에 수분을 공급 하는 방법

② Direct Water Irrigation

반응기내에 spray system을 설치하여 직접 여재표면에 수분을 공급하는 방식

③ 두 가지 방법을 혼용하는 방식

대부분의 Biofilter는 humidifier를 사용하며 humidifier를 통과한 gas의 상대습도는 대부분 100%에 근접하게 하고있다. 상용화되어있는 일부 Biofilter는 Bed에 load cell을 설치, PC로 최적의 water content를 유지하는 방법을 사용하고 있고 침출수는 Biofilter나 Humidifier로 재순환하는 경우도 있다.

4.3 운전 온도

25~35℃의 mesophilic 미생물군이 반응의 주요한 부분을 담당하는 것으로 보여지며(Ottengraf et al. 1992) 대부분의 자료에서 이 온도영역이 권장되고 있다. 35℃가 Biofilter의 호기성대사를 위한 최적의 온도라고 보고한 자료가 몇 건 있다. 상업화된 Biofilter 운전경험을 토대로한 연구결과에 의하면 (Scot 1996) 운전가능한 운전범위는 10~40℃라고 권장하고 있으며, 40℃부근에서 미생물활동이 정점에 이르러 EBCT를 줄일 수도 있다고 보고하고있다. 그 이상의 온도에서는 미생물 활동이 방해받기 시작하며 저온영역에서는 활동이 저하되어 동일한 처리 효과를 얻기 위해서는 더욱 큰 EBCT가 필요해져서 반응기 Size가 커지게 된다. 이 경우, 가열장치를 설치하여 사용하거나 waste steam을 사용하여 수분과 열을 동시에 공급하는 경우

도 있다. 적절한 장치가 마련되면 외기온도 -20℃에서도 만족스럽게 운전할 수 있다. (Lehtomaki et al. 1992) 40℃이상의 온도에서는 고온에 대한 대비뿐 아니라 필요한 수분공급을 위해서도 냉각장치를 필요로 하고 냉각장치를 사용하여 건조로에서 발생하는 204℃의 VOC 함유 Gas를 Biofilter로 처리한 경우도 보고되고 있다. (Scot 1996)

4.4 pH

대부분의 Biofilter는 초기 pH를 7~8의 중성으로 사용한다. 그리고 운전이 진행됨에 따라 pH저하 (산성화)가 관찰되고, 특히 H<sub>2</sub>S나 NH<sub>3</sub>등의 악취물질을 처리하는 경우, 이 현상은 두드러진다. 산성화물질 발생은 다음의 경우로 나누어 볼 수 있다.

- H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>함유 혹은 황화합물이 유입Gas에 포함된 경우 ⇒ H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 축적
- NH<sub>3</sub> 혹은 질소화합물이 유입되는 경우 ⇒ HNO<sub>3</sub> 축적
- 염소화합물이 포함된 경우 ⇒ HCl축적
- 미생물 대사에서 발생하는 CO<sub>2</sub>혹은 각종 유기물 ⇒ HCO<sub>3</sub> 생성

Biofilter에 과부하가 걸리면 역시 산성화의 원인이 될 수 있다. Biofilter에 설계치이상의 과부하가 걸릴경우, 미생물막내의 VOC농도증가 ⇒ 전자수용체의 부족 ⇒ VOC류의 부분산화 ⇒ 산성 중간생성물의 축적 ⇒ Bed의 부하 완충능 감소 ⇒ pH 산성화 ⇒ 생분해억제 ⇒ Failure 등의 과정으로 문제가 진행해 나갈 수 있고 ethanol을 제거하는 Biofilter에서 발견되었다.

( Warren et al. 1997)

pH가 7에서 4까지 떨어짐에 따라 미생물 활성도 같이 감소하는 것으로 보고되고 있고(Ottengraf et al. 1984) pH 6.3~8사이에서는 큰 차이가 없었지만 5.3 이하로는 뚜렷한 처리능 감소를 보고한 경우도 있다.

(Ebinger et.al 1987) 이의 완화 혹은 해결을 위하여



sodium bicarbonate 용액 등의 pH Buffering Solution을 살수하거나 정기적으로 과량살수하여 축적된 Acid를 세정하는 법, pH완충이 가능한 CaCO<sub>3</sub>를 여재에 섞는 방법, 혹은 ceramic 여재를 사용하여 지속적으로 축적된 acid를 세정하도록 하는 Biotrickling Filter를 적용하는 등의 방법이 사용되고 있다.

#### 4.5 미생물

VOC제거에 사용하는 Biofilter의 미생물은 대부분 Chemoheterotrophs로 알려져있으며 악취를 유발하는 물질이 대부분 무기화합물로 유입되는 경우에는 CO<sub>2</sub>를 탄소원으로 사용하는 Chemoautotrophs가 우점종으로 알려져있다. (Mueller 1988) Biofilter에서 발견되는 대부분의 미생물들은 토양에서 발견되는 미생물과도 유사하다. (Deviny et al. 1990) 깊이에 따라 분포와 종류가 상이한 성층현상이 공통적으로 발견되고(Ottengraf et al. 1983), (Korsky et al. 1988) 유입구 부근에서 상대적으로 높은 미생물 밀도를 발견할 수 있으며 Biofilter 아래부분으로 내려갈수록 적은 양의 다양한 미생물들이 보다 복잡한 형태의 기질들과 함께 발견된다. (Korsky et al. 1988) Compost를 사용하는 대부분의 Biofilter는 별도 종균을 필요로 하지 않으나 실시하는 경우에는 하수처리장에서 얻은 반송 슬러지를 사용하는 경우가 많다. (Ottengraf et al. 1985) 이 방법은 수처리장의 악취를 처리하려는 경우에는 더욱 논리적인 선택이 될 수 있고 기본적으로 다양한 미생물을 보유하고 있고, 다양한 기질대사에 잠재적인 가능성을 갖고있는 점에서 수처리장 슬러지는 좋은 inoculum이 될 수 있는 특성을 가지고 있다고 할 수 있다. (Clark et al. 1992) 또 특정한 물질을 분해하거나 반응효율을 증가시키기 위해 별도로 배양한 균주를 사용하는 연구가 많이 보고되나 보편적이지는 않다.

Bacteria	Fungi
Antinomycetes sp.	Penicillium sp.
Bacillus sp.	Cephalosporium sp.
Euterobacteriaceas sp.	Mucor sp.
Micrococcus sp.	Cincinella sp.
Mycooides sp.	Cephalotecium sp.
Norcodia sp.	Ovularia sp.
Pseudomonas sp.	Stemphilium sp.
Sretomyces sp.	
Thiobacillus sp.	
Xanthobacter sp.	

미생물활동과 관련하여 별도로 언급할 수 있는 것이 Compost를 주요 여재로 사용하는 Biofilter에서 주로 발견되는 aging effect이다. 이것은 미생물들이 기체상 기질뿐 아니라 여재 자체를 대사원으로 활용함에 따라 발생하는데, 이 경우, 압밀, 압력손실 증가, channeling 등을 발생시키고 결국 처리능을 저하시키게 된다. 유일한 대책은 전체 여재를 교체하는 것이고, 현재 다른 종류의 여재와 혼합사용하여 교체시기를 늦추려는 시도와 미생물에 의해 대사되기 어려운 다른 종류의 여재를 개발하려는 노력이 진행중이다. (Ottengraf 1986)

#### 4.6 순양 및 기타 고려하여야 할 사항

순양시간은 초기운전에서부터 시작하여 최대 제거효율을 나타낼 때까지의 시간을 말한다. 비교적 쉽게 분해되는 물질들을 대상으로 Biofilter기술을 적용할 경우, Compost Biofilter는 2주이내에 순양되었다 (Ottengraf et al. 1984) 또, 한 달이내에 최대효율을 달성하였다. (Korsky et al. 1989) 순양시간은 시운전 단계에서 얼마만큼의 시간을 필요로 하는지 혹은 운전 중단인 경우 재가동에 들어가서 정상적인 성능을 내기 위해 필요한 시간이 얼마나 걸리는지를 산정하기 위해 알아야 하는 중요한 요소이다. 상식적으로 여재에 원래 미생물이 적거나, 복합물질을 대상으로 하거나 생분해

표4. Biofilter에서 확인된 미생물들 (medina 1993)



도가 낮은 물질을 대상으로 할 때 더 오래걸린다. (Torrönen et al. 1992, Ergas et al 1993) 재가동을 위한 순양은 적절한 온습도 유지, 호기성 유지등이 중요한 조건이 된다. 이는 설치한 Biofilter를 VOC발생공정의 운전중단에도 불구하고 재순양시간을 줄이기 위해 필요한 조치가 될 수 있다. 따라서 최소한 호기성 상태를 유지하는 것을 권장할 수 있다. 이러한 재순양 과정은 Biofilter의 설계와 운전에 있어서 중요한 고려사항이 될 수 있다. BTX를 대상으로 일정기간의 운전중단기간의 영향을 관찰한 연구결과에 따르면 다른 기질로 재순양 하는 기간이나 장시간의 운전중단 기간후에 재순양하는 경우 모두 새로운 여재로 순양하는 것보다 짧은 시간이 소요되었고 운전중단기간동안 humid air를 계속 유입시켜준 경우에 재순양시간이 단축되었다. 최대 2주의 운전중단기간후에 재순양을 할 경우, 초기 순양에 소요된 시간의 1/3정도에 이전 운전효율을 회복하였다. (Jason et al. 1996)

균등한 Gas분배와 Bed내에서의 흐름상태 역시 Biofilter의 운전에 있어 중요한 요소이다. 여과층의 다짐현상, 불균등 살수, 미생물에 의한 유로막힘등은 Bed내의 Channeling을 유발 시키고 운전성능을 낮추는 결과를 가져온다. 이에 의해 주기적인 여재표면 관리가 필요해진다. 압력손실은 운전비에 영향을 미치는 요소이며 되도록이면 낮게 유지하는 것이 전체 운전비용을 낮추는 방안이 될 수 있다. 압력손실은 유속증가, Water content와 평균입경의 감소에 비례한다. (medina 1993) 지속적인 VOC대사에 의한 영양염류부족 또한 관심을 갖고 제어해야할 항목이라고 할 수 있다.

Hexane을 대상으로하는 Compost Biofilter실험에서 상용화된 Compost에서의 질소부족이 관찰되었으며 주기적인 살수조작에 KNO<sub>3</sub>용액을 사용하는 것이 효과적이었다. (Eberhard et al. 1996)

## 5. 결론

본 논문은 VOC 및 악취제거를 위한 Biofilter 기술에 관한 개관을 목적으로한다. Biofilter의 기본원리, 주요 운전변수, 운전시의 고려하여야 할 사항들에 대한 여러 가지 연구결과들을 간략히 요약하였다. Biofilter는 상대적으로 적은 비용으로 저농도 대유량 혹은 저농도 소유량의 VOC나 악취를 대상으로 응용할 수 있는 대기오염방지기술이다. Biofilter는 충진여재의 표면에 생성된 Biofilm의 대사를 주요반응 기제로 활용하며 운전에서 있어서의 주요 변수는 EBCT, 표면부하, 질량부하, 제거능 등이고 설계 및 운전시에 고려하여야할 요소들로는 여재선정, 습도, 온도, pH, 미생물, 순양등이 있다. Biofilter는 아래의 표에서 볼 수 있듯이 주로 경쟁하게 되는 활성탄흡착이나 TO, RTO, RCO등의 소각기술에 비하여 설치, 운전에서 상당한 가격 경쟁력을 가지면서도 안정적인 처리능이 있다는 장점이 있다.

표5. 단위부피당 VOC처리비용비교 / (US\$/106ft<sup>3</sup>air)

(Bohn HL et al. 1992)

Control Technology	Total Cost	Normalized Cost
Incineration	130	16.25
Chlorination	60	7.5
Ozone	60	7.5
Activated Carbon	20	2.5
Biofiltration	8	1

상대적으로 넓은 소요부지와 지속적인 유지관리를 필요로 하는 점등이 단점으로 지적될 수 있지만 경량여재를 사용하여 복층화한다든지, Humidifier등을 대체, 간소화 하는 등의 장치개선을 통하여 극복할 수 있다.

Biofilter는 저렴한 비용, 안정적인 처리능, 친환경적인 제거기제로 인구밀도가 높고 도시화가 많이 진행되





표6. Odor Control Tech. 비용비교(Vaith K. et al. 1996)

Parameter	Control Technology		
	Packed Tower Wet Scrubbing	Mist Scrubber	Biofilter
Construction Cost (US \$/cfm)	29.29	46.67	25.00
Operation Cost (US \$/cfm)	1.17	1.87	1
Operation Cost (US \$/cfm)	4.77	7.33	0.7
H2S Removal Efficiency (%)	99.66	90.0	99.5

어 VOC 및 악취에 의한 환경피해 가능성이 많은 한국의 상황에 폭넓게 적용할 만한 기술로 제안할 수 있다.

〈상담문의 전화 : 364-2922〉

■ 참고문헌 ■

1. Warren J. Swanson and Raymond C. Loehr, "Biofiltration : Fundamentals, Design and Operations Principles, and Applications", J of Environmental Engineering, June 1997 538~546
2. Gero Leson et al., "Biofiltration : An Innovative Air Pollution Control Technology For VOC Emissions", J. Air Waste Manage. Assoc. Vol.41, No. 8
3. S. P. P. Ottengraf et al., "Kinetics of Organic Compound Removal from Waste Gases with a Biological Filter", Biotechnology and Bioengineering, Vol.XXV, 3089~3102, 1983
4. Victor F. Medina, "Development of Bbiological Ffilters Using GAC as the packing material : Application for Treating Gasoline Vapors"
5. Douglas S. Hodge, "Biofiltration : Application for treatment of ethanol vapors"
6. Eberhard Morgenroth et al., "Nutrient Limitation in a Compost Biofilter Degrading Hexane", J. AWMA 46:300~308
7. F. Jason Martin et al., "Effect of Periods of Non-Use on Biofilter Performance", J. AWMA 46 : 539~546
8. Joseph S. Deviny et al., "Monitorign Biofilters Used for Air Pollution Control", Practice periodical of hazardous, toxic and radioactive waste management", April 1998, 78~85
9. Douglas S. Hodge et al., "Modeling Removal of Contaminants by Biofiltration", J. of Environmental Engineering, Vol. 121, No.1, Jan. 1995
10. Edward N. Ruddy et al. "Select the best VOC control strategy", Chemical Engineering Progress, July 1993.
11. Scot Standefer et al., "Evaluating Biofiltration", Environmental Technology, July/Agust 1996