



바이오필터 기술의 원리와 적용에 관한 고찰

남궁완 · 박준석 · 이노섭
 건국대학교 공과대학 환경공학과

Principle and Application of Biofiltration

Wan Namkoong, Joon-Seok Park, Noh-Sup Lee
 Department of Environmental Engineering, College of Engineering, Konkuk University

ABSTRACT

Biofiltration is an environmentally-sound technology for elimination of VOCs and odorous compounds from low-concentration, high-volume waste gas streams because of its simplicity and cost-effectiveness. It can be applied to the treatment of gases from publicly owned treatment works, composting facilities, landfill sites, and soil vapor extraction systems. The ability to design an effective biofilter system involves a combination of fundamental biofilter knowledge, practical experience, and bench- and pilot-scale testing. The objective of this paper was to review principle, design parameters, operational conditions, case studies, and economy of biofiltration through literature.

Key Words : biofiltration, VOCs, landfill site, composting facility, soil vapor extraction

초록

바이오필터 기술은 수백 ppmC의 저농도 배가스를 처리하는 데에 있어 효과적이며, 비용이 저렴하고 환경적으로 건전한 처리방법이다. 적용범위로는 폐수처리장, 퇴비화시설, 음식물가공공장에서 발생하는 악취를 비롯하여 매립지가스 및 토양증기추출(SVE, soil vapor extraction)시 발생하는 휘발성 배가스의 처리 등이 있다. 바이오필터 기술을 효과적으로 적용하기 위해서는 문헌연구를 꼼꼼하게 실시한 후 실험실규모, 파일롯트규모, 그리고 현장규모로 점차 확대하여 실시하는 것이 바람직하다. 본고에서는 바이오필터 기술의 원리, 설계인자, 운전조건, 적용사례, 그리고 경제성 평가를 중심으로 고찰하였다.

주제어 : 바이오필터, 배가스, 악취, 매립지가스, 토양증기추출

1. 서론

바이오필터 기술은 가스상의 오염물질을 미생물, 산소, 수분 및 영양물질 등이 충족되어 있는 충전물질을 통과시켜 이산화탄소와 물로 전환시키는 공정이다(Bohn, 1996). 1960년대에 유럽과 미국에서 사용된 바이오필터

기술은 유공관위에 토양을 덮은 뒤 유공관으로 배가스를 주입시키는 비교적 간단한 시스템이었다. 이 방법은 악취 제거에는 효과적이었으나 공기분배장치의 막힘, 공기균등분배의 어려움, 그리고 수분증발에 의한 효율저하 등의 문제가 있었다. 1970년대에는 좀 더 발전된 개방형 시스템이 유럽에서 유행하였는데 콘크리트로 벽을 쌓

은 후 공기를 공급할 수 있도록 하였다. 바이오필터 충전재료로는 압밀이 적게 일어나도록 하기 위하여 퇴비나 피트(peat)를 나무조각, 나무껍질, 기타 공극을 유지할 수 있는 입상형 무기물 등과 혼합하여 사용하였다. 그러나 압력강하와 공기가 균등분배되지 않고 충전물질의 갈라진 틈새를 따라 흐르는 단회로(channelling)현상이 일어나는 단점이 있었다. 바이오필터에서 발생하는 일반적인 문제점으로는 충전물질의 수분조절의 어려움, 압밀, pH저하 등이 있다. 1980년대에는 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 밀폐형 시스템에 공극율이 높은 물질들을 충전하였으며 자동모니터링장치와 자동수분조절장치를 설치하였다. 이와 같은 시스템을 여러 가지 시설에 적용하여 본 결과 높은 효율성이 인정되어 유럽의 여러 국가에서 널리 사용되게 되었다. 현재 바이오필터 기술은 수백 ppmC의 저농도 배가스를 처리하는 데 있어 효과적이며, 비용이 저렴하고 환경적으로 건전한 처리방법으로 인정받고 있다.

적용범위로는 폐수처리장, 퇴비화시설, 음식물가공공장에서 발생하는 악취를 비롯하여 매립지가스 및 토양증기추출(SVE, soil vapor extraction)시 발생하는 휘발성배가스의 처리 등이 있다(Rettenberger, 1996; Figueroa, 1996; Lith 등, 1997; Galask 등, 1990; Wright 등, 1997; Leson 등, 1997; 남궁 등, 1999a; 남궁 등, 1999b; 남궁 등, 2000).

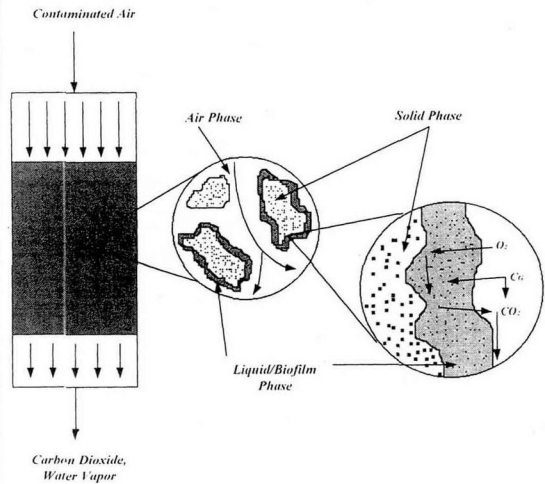
바이오필터 기술의 장점은 다음과 같다. 소각에서처럼 연료가 필요하지 않으며, 화학약품의 첨가도 필요없고 비용이 기타 방법에 비하여 저렴하다. 또한 처리공정이 안전하며 미생물효소는 자생적으로 끊임없이 성장하고, 처리 후 NOX, CO 등 유해가스의 발생도 없다. 그러나 가스상 오염물질의 분해효율이 화합물에 따라 달라지며 바이오필터의 유지관리에 세심한 주의가 필요하다는 단점도 있다.

본 연구에서는 악취물질 뿐만 아니라 오염도양증기추출배가스 처리에도 적용가능한 바이오필터 기술에 대하여 원리, 설계방법 그리고 사례연구 등을 중심으로 기존의 문헌에 근거하여 정리하고 고찰하였다.

2. 기술의 원리

바이오필터 기술의 주요 장치는 미세입자 제거장치, 유입가스 조절장치, 유입가스에 수분을 포화시키기 위한 사전가습장치(humidifier), 충전물질이 채워진 바이오필터 등이다. 바이오필터 기술의 일반적인 처리 모식도는 [Fig. 1]에서 보는 바와 같다. 충전물질을 통과하는 오염가스는 이류, 확산, 흡착 그리고 생물학적 분해단계를 거치면서 제거가 된다. 초기에는 흡착에 의한 제거가 주를

이루지만 계속되는 오염물질 유입으로 흡착에 의한 제거보다는 생물학적 반응에 의한 제거가 주 메카니즘이 된다. 제거 메카니즘에 관한 몇 가지 이론을 살펴보면 다음과 같다.



[Fig. 1] Schematic diagram for waste gas treatment in biofiltration.

2.1 헨리의 법칙

오염물질의 특성은 생물학적 처리에 있어서 중요한 의미를 갖는다. 이러한 특성을 수치로 표현한 것 중의 하나가 헨리상수이다. 가스상 오염물질은 바이오필터를 통과하면서 생물막(biofilm)에 흡착이 되어야 생물학적으로 쉽게 분해될 수 있다. 헨리상수는 가스분압과 액상농도와와의 관계를 나타내는 것으로 헨리상수가 낮을수록 오염물질이 액체에 많이 녹아있을 수 있음을 의미한다. 바이오필터에 의한 효과적인 처리를 위해서 오염물질의 헨리상수는 최소한 0.01미만이여야 한다(Webster 등, 1998; Tchobanoglous 등, 1993).

$$CG = KH \cdot CLeq$$

여기서, CG = 기체상의 오염물질 농도 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ of air)

CLeq = 평형상태 액체상의 오염물질 농도 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ of water)

KH = 헨리상수 (무차원)

2.2 물질전달속도

바이오필터를 효과적으로 수행하기 위해서는 오염물질이 빠르게 생물막에 흡착된 후 이동되어야 한다 (Deviny 등, 1999). 다른 조건이 동일할 경우 오염물질의 전달속도는 바이오필터의 비표면적에 따라 달라진다. 다음 식은 물질전달속도를 나타낸 것으로 기체-액체 경계면에서의 농도는 일정하다고 가정하며, 오염물질은 평형상태와 비평형상태에서의 액체상 오염물질 농도의 차이가 클수록 빠르게 전달된다.

$$dCG/dt = k(CLeq - CL) = k(CG/KH - CL)$$

여기서, CG_i = 기체상의 초기 오염 물질 농도 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ of air)
 k = 물질전달상수

2.3 지체계수

흡착현상은 오염물질 이동시 지체현상을 일으키며 바이오필터 처리효율에 큰 영향을 미친다(Devanny 등, 1999). 흡착된 오염물질이 바이오필터에 오래 머물러 있을수록 처리효율이 높아지는데 이를 수식으로 나타낸 것이 지체계수(R, retardation factor)이다. 이는 바이오필터 단위부피당 존재하는 오염물질량을 기체상으로 존재하는 오염물질량으로 나눈 값이며, 다음과 같이 구할 수 있다. 일반적으로 지체계수는 10에서 10,000의 범위를 갖는다. 지체계수가 클수록 오염물질이 고·액체상에 많이 존재함을 의미한다.

$$V = (VGMG + V_{ads}M_{ads}) / (MG + M_{ads})$$

위 식에서 고·액체상에서의 오염물질 이동속도는 기체상에서의 이동속도에 비하면 매우 작은 값이므로 $V_{ads} \approx 0$ 으로 보고 식을 전개하면, $V = VGMG / (MG + M_{ads}) = VG/R$ 이 된다.

여기서,

V = 오염물질의 평균이동속도

VG = 충전물질 공극내를 흐르는 가스의 이동속도

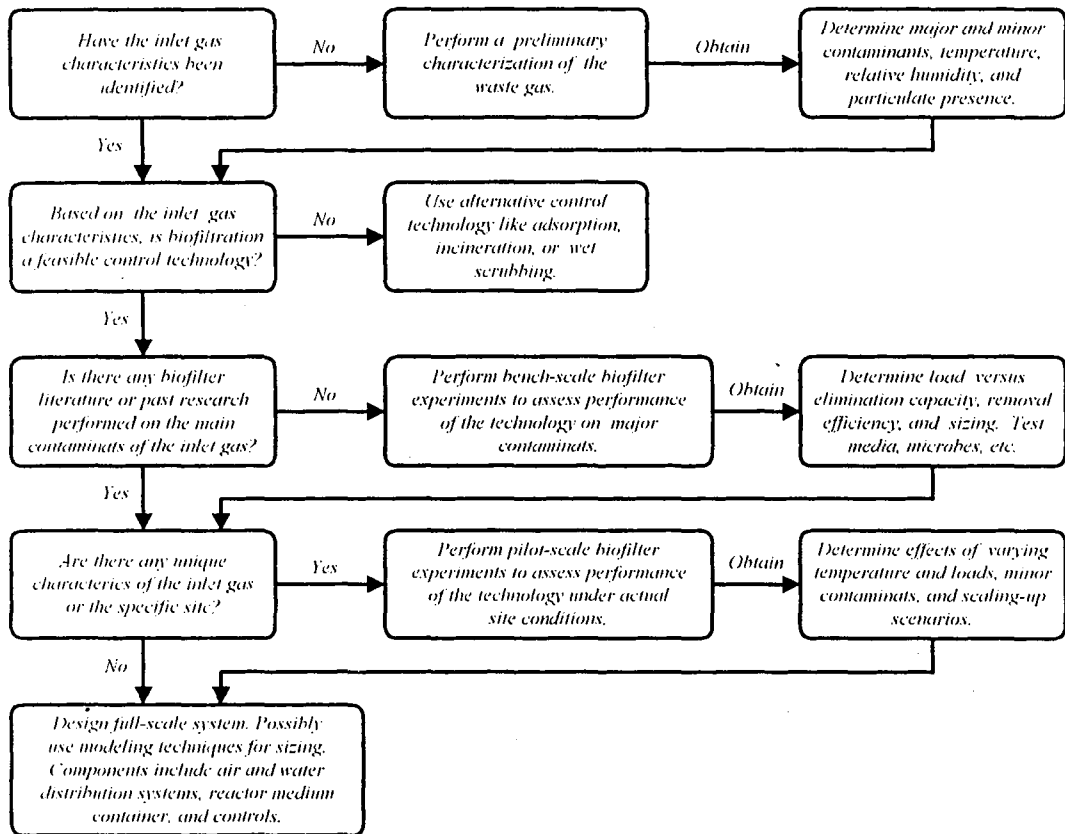
V_{ads} = 고·액체상에서의 오염물질 이동속도

MG = 바이오필터 단위부피당 기체상의 오염물질량

M_{ads} = 바이오필터 단위부피당 고·액체상의 오염물질량

2.4 생물학적 분해

바이오필터에서의 생물학적 분해는 토양이나 폐수의 생물학적 정화와 유사하다. Monod식은 생물학적 분해에 관한 여러 가지 모델식의 하나이며 다음과 같다. 유입농도가 K_s 보다 매우 클 경우 상대적으로 K_s 값은 무시되므로 생물학적 분해율은 $\mu \approx \mu_m$ 가 되어 0차반응에 따른 분해특성을 가진다. 반대로 유입농도가 K_s 보다 작은 경우에는 분해율은 유입농도에 비례하는 1차반응 특성을 갖는다. 그러므로 바이오필터의 유입부분은 상대적으로 높은 농도를 유지하므로 0차반응 특성을 나타내며, 바이오필터 유출부로 갈수록 농도가 감소하면서 1차반응에 의한 분해특성을 나타낸다(Webster 등, 1998;



[Fig. 2] Decision-making process in planning and designing an effective full-scale biofiltration system.

[Table 1] Typical biofilter design and operating conditions for waste air treatment

Parameter	Typical Value
Biofilter layer height (m)	1
Biofilter area (m ²)	1~3,000
Waste air flow (m ³ /h)	50~30,000
Biofilter surface loading (m ³ /m ² ·h)	5~500
Biofilter volumetric loading (m ³ /m ³ ·h)	5~500
Bed void volume (%)	50
Mean effective gas residence time (s)	15~60
Pressure drop per meter of bed height (cm)	0.2~1.0cm of water (10cm max)
Inlet pollutant and odor concentration (g/m ³)	0.01~5,500 (500~50,000 odor units/m ³)
Operating temperature (°C)	15~30
Inlet air relative humidity (%)	>98
Water content of the support material (%)	60 by mass
pH of the support material	6~8
Typical removal efficiencies (%)	60~100

Devanny, 1998).

$$\mu = \mu_m S / (K_s + S)$$

여기서,

$$\mu = \text{오염물질 분해율 (time-1)}$$

$$\mu_m = \text{최대 오염물질 분해율 (time-1)}$$

$$S = \text{오염물질 유입농도 (g/m}^3\text{)}$$

$$K_s = \text{Monod상수, 최대오염물질 분해율의 1/2이될때의 유입농도 (g/m}^3\text{)}$$

3. 시스템 설계 및 운전

오늘날 산업시설에서 배출되는 가스는 오염물질의 종류, 농도, 유량 및 배출온도 등이 매우 다양하다. 이러한 오염가스를 바이오필터로 처리시에는 여러 가지 단계의 연구를 실시한 후에 설계하는 것이 바람직하다 (Devanny 등, 1999). [Fig. 2]는 바이오필터를 설계하여 현장규모로 적용하기까지의 순서를 나타낸 것이다. 먼저 문헌연구를 거친 후 실험실규모, 파일롯규모로 그리고 현장규모로 확대한다. 문헌연구에서는 배출되는 오염가스가 바이오필터법으로 처리가능한지를 판단하며 최대제거능력은 어느 정도인가를 조사한다. 실험실규모의 실험에서는 대상오염가스에 대하여 기초적인 실험을 실시하며, 이 때의 연구항목으로는 최저부하율 및 최대부하율, 수분조절방법, 온도의 영향, 그리고 미세입자상 물질의 제거방법 등이 있다. 여기에 모델링을 적용하면

보다 효과적으로 최대제거능 및 제거효율을 예측할 수 있다. 앞의 실험결과를 바탕으로 규모를 좀 더 확대하여 파일롯규모의 실험을 진행한다. 이 단계에서는 실제 현장의 오염가스 농도를 모니터링함으로써 평균 가스 부하량 및 유입농도의 변화량을 파악하여 대상가스의 실험규모 처리가능성을 결정한다.

처리대상 가스에 대하여 원하는 제거효율을 얻기 위하여 필요한 바이오필터의 부피는 주로 바이오필터의 분해용량에 대한 배가스의 오염물질부하율과 오염물질 농도에 따라 달라진다. 대기오염물질에 대한 분해율은 10~100g/m³·h가 일반적이다(Lith 등, 1997). 만약 각각 다른 미생물에 의하여 분해되는 몇 가지 유기화합물이 배가스내에 존재한다면 각각의 화합물에 대한 것보다는 총분해율에 따라 분해용량을 결정해야 할 것이다. 바이오필터를 과다 설계할 경우에는 종종 최대부하시 초과 현상을 막을 수 있는 충분한 완충용량을 제공하기도 한다. 그러나 일시적인 최대부하보다는 오히려 시간평균에 기초하여 설계하는 것이 바람직하다. 특정화합물질에 대한 바이오필터의 완충용량은 대상오염물질의 물에 대한 용해도와 표면부하율에 따라 다르다. 가스유량도 바이오필터상의 크기 결정에 어느 정도의 영향을 줄 수 있다. 300m³(배가스)/h/m²(바이오필터)까지의 표면부하는 압력손실을 일으키지 않는 수준이다. 500m³/m²·h의 표면부하까지는 처리효율이 크게 저하하지 않으며 퇴비와 나무껍질을 혼합한 바이오필터의 경우 압력손

[Table 2] Comparison of biofilter media

Classification	biofilter media			
	Soil	Wood bark, Compost	Activated Carbon	Ceramic, Plastic
Surface Area, m ² /g wet	1-10	5-10	5-10	1
Gas Sorption Capacity, g/kg wet	<<10	1	2	<<1
Density, wet	1.5	0.5	0.4	0.4
Bearing Strength	high	low	medium	high
Air Permeability	low	medium	medium	high
Backpressure, kPa	0.5-1.5	0.2	0.1	0.1
Bacteria/g	10 ⁷	10 ¹⁰	0	0
pH Buffering Capacity	high	low	0	0
Nutrient Supply	high	high	0	0
Hydrophilic, dry	yes	no	no	yes
Area for Rapidly Biodegradable Gases, m ² /m ³ /hr	0.06	0.03	0.02	0.02
Lifetime, years	>30	2-5	5	10-30

실을 적게 일으킨다. 표면부하가 높을 경우 바이오필터는 유입가스조건이 부적합하여 바이오필터의 건조와 열손실이 발생하게 된다. 그러므로 특히 표면부하가 높을 경우에는 바이오필터의 온도와 습도를 적당하게 조절하는 것이 필요하다. 오염가스를 처리하기 위한 바이오필터의 일반적인 설계 및 운전조건을 간략히 정리하여 Table 1에 나타내었으며(Webster 등, 1998), 세부적인 사항들에 대하여 좀 더 살펴보면 다음과 같다.

3.1 반응기 선택

반응기는 개방형과 밀폐형이 있다. 반응기의 재료는 오염가스의 종류를 검토한 후 내구성이 있는 재료를 선정하여야 한다. 예를 들면 황화수소나 염소계 휘발성화합물을 처리하는 경우에는 산성 응축수가 발생하기 때문에 산부식에 강한 물질을 사용하여야 하며, 휘발성 유기화합물일 경우에는 유기용제에 내구성이 있는 재료를 사용하여야 한다. 반응기 내벽에는 배플(baffle)을 설치하여 오염가스가 벽을 타고 그대로 배출되는 월링(walling)현상을 최소화한다.

3.2 바이오필터 재료선택 및 관리

바이오필터 충전물질로는 자연에서 얻어진 토양, 퇴비, 나무껍질, 피트(peat) 등이 있으며 인공적으로도 합성이 가능하다(Bohn, 1996). [Table 2]는 몇 가지 충전물

질의 종류별 특성을 나타낸 것이다.

바이오필터 충전물질이 처리효율에 미치는 영향은 매우 중요하다. 충전물질들이 갖추어야 할 조건을 요약하면 다음과 같다. 충전물질 내에는 오염가스를 분해할 수 있는 충분한 양의 미생물이 존재하여야 한다. 바이오필터 내에서 가스상 오염물질을 분해하는 미생물로는 세균(bacteria), 방선균(actinomycetes), 곰팡이(fungi) 등이 있다. 토양과 퇴비는 각각 10⁹ bacteria/g과 10¹⁰ bacteria/g의 높은 미생물밀도를 갖고 있다. 그러나 인공충전물질은 미생물을 함유하고 있지 않기 때문에 처음에는 토양, 퇴비 또는 하수슬러지 등으로 식종한 후 미생물을 증식시켜야 한다. 미생물군집들은 유입되는 가스의 종류와 농도에 따라 달라진다.

나무껍질이나 피트와 같이 비교적 분해가 어려운 물질들도 처음에는 분해미생물들의 수가 적지만 곧 유입가스를 처리할 수 있게 적응된다. 충전물질에 서식하는 미생물군집은 바이오필터의 조건에 쉽게 적응할 수 있다. 미생물들은 실험실에서 배양될 수도 있지만 이들 미생물들이 자연적으로 자생한 미생물보다 우수하다고 생각하는 것은 잘못된 생각이다. 바이오필터에 특정미생물을 첨가하는 것은 1~2일 동안만 분해를 촉진시킬 수 있을 뿐이기 때문에 적응력이 더 강한 자연미생물을 선택하는 것이 바람직하다. 특정미생물군집 유지에는 각별한 주의가 필요하기 때문이다. 충전물질은 미생물증식에 필요한

충분한 영양물질을 함유하고 있어야 하며 부족할 경우에는 영양물질 첨가를 실시하기도 한다. 퇴비물질은 미생물들이 생물상형성에 필요한 N, P, K와 같은 무기영양물질도 충분히 함유하고 있다. 무기영양물질이 결여된 충전재에서 미생물생체량(biomass)은 침출수와 함께 배출되는 수가 있으므로 이 경우에는 쉽게 용해되지 않는 화학비료를 첨가한다. 그러나 화학비료 첨가는 생물막을 과도하게 성장시키므로 주의깊게 고려한 후 행한다.

가스가 원활히 통과하지 못하는 경우 압력손실을 일으키며 부분적으로 혐기성 상태를 유발하므로 충분한 유효공극을 유지할 수 있어야 한다. 충전물질내의 무기물함량이 증가할수록 pH완충능력은 증가한다. pH완충능력이 낮은 유기성 바이오필터에는 석회를 첨가하여 보충할 수 있으나, 이 경우 바이오필터의 압밀을 증가시킬 수 있다. pH는 6~8이면 적당하다. pH5 미만에서는 대부분의 미생물들은 활동이 저하된다. 가스 중에 포함되어 있는 황과 질소는 산화되어 황산과 질산으로 변화한다. 분해용이한 고농도의 가스에서는 초기에 가스와 바이오필터가 접촉하는 부분에서 유기산이 형성되어 pH가 2~3까지 떨어진다. 그러나 바이오필터를 계속 운전하면 일반적으로 pH는 중성쪽으로 회복된다. 바이오필터는 미생물 장애가 없도록 충분한 수분을 함유하고

있어야 한다. 수분함량은 수분보유능력(field capacity)의 60~80%로 조절하면 미생물활성을 최대화할 수 있다 (Namkoong, 1988). 남궁 등(1998, 1999)은 퇴비 바이오필터 수분보유능력의 60~80%로 수분을 조절하여 매립지가스 중의 악취물질을 효과적으로 처리하였다. 충전물질이 건조해질 경우에는 갈라지는 곳이 발생하여 이곳으로 오염가스가 그대로 통과하는 단회로현상이 일어난다. 수분함량이 과도하게 높을 경우에는 가스이동 통로가 좁아져 압력손실이 증가하며 혐기성 상태가 되기도 한다. 또한 침출수가 발생하여 오히려 환경에 악영향을 미치게 된다. 온도가 10℃ 증가하면 반응속도가 2배 증가하게 되지만 이와 함께 생물막으로의 가스전달 및 흡착속도가 감소하게 되므로 너무 높은 온도는 좋지 않다. 바이오필터 온도는 15~30℃ 정도의 중온성이 적합하다. 이 범위를 벗어날 경우 가스를 가열하거나 냉각하여야 하며 이는 설치비와 운영비를 증가시키는 원인이 된다. 이때에 대기중의 공기로 희석하여 냉각하는 방법을 고려할 수 있지만 바이오필터 용적을 증가시켜 운영비가 많이 소요된다.

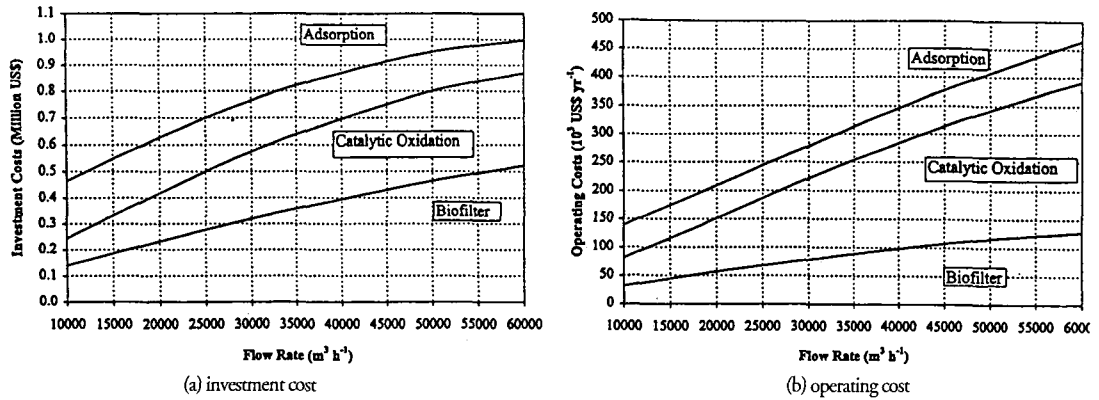
3.3 입자상물질 제거

오염가스에 포함되어 있는 입자상물질은 충전물질 유

[Table 3] Case studies of biofiltration

Contaminat	Filling Material	EBRT (min)	Bed Height (m)	Input Concentration (mg/m ³)	Maximum Elimination Capacity (g/m ³ /hr)	Removal Efficiency (%)	Ref.
Toluene	compost	6.6	1	2,300	>45	>90	김 (1999)
Toluene	GAC	9.8	1	<14,000	>160	>90	박 (2000)
H ₂ S	compost	0.12-3.3	-	5-2,651ppm	58	93.5-100	Allen et al. (1993)
H ₂ S in LFG	compost + clay	-	-	150	-	≈100	Rettenberger (1996)
ethanol, aldehydes	compost	≈0.85	-	700ppm	40	65-75	Dharmavaram et al. (1993)
BTEX	compost	0.4-6	-	230-830	0.8-75	30-97	Thompson et al. (1996)
NH ₃ and H ₂ S in LFG	compost	-	-	1,996(NH ₃), 1,052(H ₂ S)	-	98.7(NH ₃), ≈100(H ₂ S)	Frechen (1989)
gasoline	GAC + peat	0.75-6	1.02	600	-	50	Leson et al. (1997)
gasoline	compost + wood chip	2-10	1.2	300-2,700	-	73-93	Wright et al. (1997)
TPH	compost + lime	22	4	2,000-24,000 ppmC	-	50-90	Leson et al. (1997)

[Fig.3] Investment and operating costs versus air flow rate.



입부분의 공극을 막아 압력손실을 증가시킨다. 또한 기름이나 지방성분의 고분자 화합물질을 흡착하여 오염가스가 통과할 때 거품을 발생시키므로 사전에 이를 제거하여야 한다.

3.4 유입가스 조절

바이오필터로 유입되는 가스는 미생물에 영향을 미치는 독성물질을 함유하고 있거나 고농도일 경우 처리효율에 영향을 미치므로 독성물질을 사전에 제거하거나 희석 등을 통한 전처리가 필요하다. 가스내 최대 VOCs 농도는 3,000~5,000mg/m3을 넘지않아야 한다.

3.5 압력강하

바이오필터 운영상의 어려움 중에 하나는 충전물질 내부에서 일어나는 과도한 압력강하이다. 압력강하를 줄이고 바이오필터 수명을 연장하기 위해서는 세라믹, 플라스틱, 활성탄 또는 나무조각 등과 같이 분해가 어렵거나 느리게 일어나는 물질들을 퇴비 등의 유기물과 섞어 충전재료로 사용한다. 이와 같은 바이오필터는 압력강하를 줄여주고 수명을 연장할 수 있는 이점이 있으나 비용이 증가하는 단점이 있다. 압력강하는 탈취상의 표면적, 깊이, 투수계수, 가스유량에 따라 달라진다. 퇴비 바이오필터의 압력강하는 500Pa 이하이다. 토양은 분해 용이한 가스의 경우에는 0.5~1.5Pa, 분해가 어려운 가스의 경우에는 500Pa 이하의 압력강하가 있다.

3.6 충전물질 교체

충전물질은 일정기간이 지나면 처리효율이 저하되므로 교체하여야 한다. 압밀이 쉽게 일어나는 충전물질은 기계를 이용해 뒤집기를 해 줄 필요가 있으며 일년이 넘기전에 1회 정도 교체를 한다. 충전물질을 교체하는 일은 번거로우며 비용이 많이 소요되는 작업이다. 교체한 충전물질은 일반적으로 유허폐기물은 아니지만 이들을 처

리하는 것 역시 비용이 소요되기도 한다. 교체는 압력강하가 증가하고 처리효율이 저하할 때에 실시한다. 충전물질 수명은 2~7년이 보통이다. 충전물질을 교체하는데 소요되는 비용은 충전물질의 수명, 용적 그리고 단위 부피당 처리비용에 따라 변한다. 퇴비를 다른 물질과 섞지 않고 쓰는 경우에는 \$30~50/m3의 비용이 소요된다. 충전물질을 혼합하여 사용한 경우에는 수명이 연장되지만 이 때에는 \$100~300/m3의 비용이 소요된다.

3.7 모니터링

바이오필터를 유지관리하기 위해서는 수분을 측정하고 기타 운전인자들을 기록하는 장치가 필요하다. 유지관리에 필요한 인원은 시스템의 관리용이성에 따라 달라 지지만 수백 m2의 개방형 시스템을 유지관리하기 위해서는 3~4명의 인원이 필요하다. 충전물질 건조, 압밀로 인한 문제점들을 조사, 점검하고 장치를 보수할 수 있는 인력이여야 한다.

4. 적용사례

바이오필터 적용시 가장 중요한 항목들은 충전물질의 종류, 유입부하량, 그리고 최대부하량 등이다. 본 절에서는 최근에 관심의 대상이 되고 있는 BTEX를 비롯한 석유계 화합물을 중심으로 충전물질의 종류, 유입부하량, 그리고 최대부하량에 대하여 Table 3에 정리하였다. 충전물질 재료로는 주로 퇴비, 활성탄, 그리고 피트(peat) 등이 사용되었다.

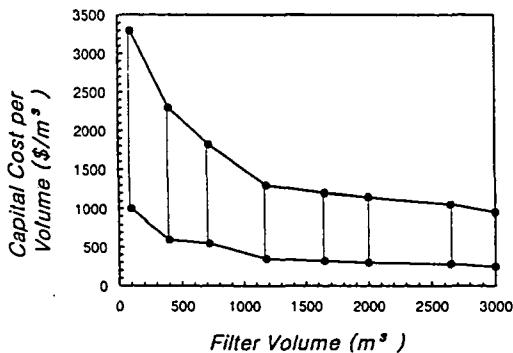
5. 경제성 평가

미국과 유럽 등지에서 적용되었던 바이오필터의 시설 및 운전비용을 활성탄흡착 및 저온산화법과 비교하여 [Fig. 3]에 나타내었다. 시설비용은 가스유량이 증가함에

따라 증가하였으나 다른 두 방법에 비하여 상대적으로 낮았다. 그러나 운전비용에 있어서는 그 차이가 뚜렷하게 낮아 바이오필터가 비용면에서 경제적임을 알 수 있다(Devinny 등, 1999). 다음은 바이오필터의 충전물질 규모에 따른 비용을 평가하여 보았다. 규모에 따른 설치비용은 설계마다 다를 수 있으나 일반적으로 [Fig. 4]에서 보는 바와 같다(Lith 등, 1997). 이것은 1990년 이후 미국에 설치된 100m³ 이상 규모의 설치비용을 종합한 것이다. 두 줄의 선 중에서 아래 것은 개방형시설들의 설치비용이며, 위의 것은 밀폐식 다단형 시설의 설치비용이다. 단위부피당 설치비용을 비교하는 것은 동일한 처리 능력을 가진 시설에서는 의미 있는 일이다.

1,200m³ 이상에서는 규모가 증가하여도 단위부피당 설치비용은 크게 증가하지 않았다.

[Fig. 4] Estimated range of capital cost for biofilters (filter volume > 100m³).



6. 결론

본고에서는 악취물질 뿐만 아니라 오염토양증기추출 배가스 처리에도 적용가능한 바이오필터 기술의 원리, 설계방법 그리고 사례연구 등에 대하여 문헌연구를 중심으로 고찰하였다. 바이오필터 기술은 처리효율과 비용 등을 고려할 때 저농도 오염가스를 처리하는 데에 매우 효과적이며, 향후 국내에서도 다양한 분야에 적용할 수 있는 가능성이 있다고 판단된다. 국내에서 바이오필터 기술을 효과적으로 적용하기 위해서는 실제 현장을 중심으로 한 장치설치 및 운전경험 등의 축적이 선결되어야 한다.

참고문헌

김경 (1999), "오염토양의 증기추출시 발생하는 톨루엔의 biofilter 처리", 건국대학교 석사학위논문
 남궁완, 박준석, 석철영, 이철효 (1998), "생물탈취상 재료로서의 매립지복토와 퇴비가 황화수소 제거효율에

미치는 영향", 한국폐기물학회, 제15권, 제6호, pp.583-591

남궁완, 박준석, 황의영, 이노섭, 인병훈, 김정대 (1999a), "생물탈취상에 의한 도시폐기물 매립지가내 악취물질의 처리", 한국토양환경학회, 제4권, 제1호, pp.85-96

남궁완, 박준석 (1999b), "퇴비를 이용한 가솔린 오염 토양증기추출 배가스의 바이오필터 처리", 한국토양환경학회, 제4권, 제3호, 인쇄중

남궁완, 김경, 박준석, 이철효, 전연호 (2000), "오염토양 복원시 발생되는 톨루엔 배가스의 바이오필터법 적용을 위한 현장기초연구", 한국폐기물학회지, 제17권, 제1호, pp.19-27

박용진 (2000), "GAC바이오필터를 이용한 톨루엔의 처리", 건국대학교 석사학위논문

Allen, E.R. and Phatak, S. (1993), "Control of Organo-sulfur Compound Emissions Using Biofiltration-Methyl Mercaptan", Proc. Air & Waste Manage. Assoc., 86th Annual Meeting & Exhibition

Bohn, H.L. (1996), "Biofilter Media", Air & Waste Manage. Assoc., 89th Annual Meeting & Exhibition, June 23-28, 96-WP87A.01

Devinny, J.S. (1998), "Monitoring Biofilters Used for Air Pollution Control", Practice Periodical of Haza. Tox. and Radioactive Waste Management, Vol.2, No.2, Apr., pp.78-85

Devinny, J.S., Deshusses, M.A., and Webster, T.S. (1999), "Biofiltration for Air Pollution Control", Lewis Publishers Dharmavaram, S., Casey, J., Timmermans, T., and van Lith, C. (1993), "Experimental Evaluation of A Biofiltration Unit for Removal of Acetone", Proc. Air & Waste Manage. Assoc., 86th Annual Meeting & Exhibition

Figuerola, R. A. (1996), "Landfill Gas Treatment by Biofilters" in "Landfilling of Waste : Biogas" edited by Christensen, T. H. , Cossu, R. and Stegmann, R., E & FN SPON, pp535-549

Frechen, F. B. (1989), "Odour Emissions and Controls" in "Sanitary Landfilling : Process, Technology and Environmental Impact" edited by Christensen, T. H. , Cossu, R. and Stegmann, Academic Press, pp425-436

Galaska, E.G., Skladany, G.J., and Nyer, E.K. (1990), "Biological Treatment of Groundwater, Soils, and Soil Vapor Contaminated with Petroleum Hydrocarbons", 44th Purdue Industrial Waste Conference Proceedings, pp.11-21

Leson, G. and Smith, B.J. (1997), "Petroleum Environmental Research Forum Field Study on Biofilters for Control of Volatile Hydrocarbons", Env. Eng., Vol.123, No.6, Jun.,

pp.556-562

Lith, C.V., Leson, G., and Michelsen, R. (1997), "Evaluating Design Options for Biofilters", *J. Air & Waste Manage Assoc.*, Vol.47, Jan., pp.37-48

Namkoong, W. (1988), "Removal of Phenolic Compounds in Soil", Ph.D. dissertation in University of Texas at Austin, p72

Rettenberger, G. (1996), "Landfill Gas Upgrading : Removal of Hydrogen Sulphide" in "Landfilling of Waste : Biogas" edited by Christensen, T. H. , Cossu, R. and Stegmann, R, E & FN SPON, pp559-568

Tchobanoglous, G., Theisen, H. and Vigil, S. A. (1993), *Integrated Solid Waste Management : Engineering Principles and Management Issues*, McGraw-Hill Inc.

Thompson, D., Sterne, L., Bell, J, Parker, W, and Lye, A. (1996), "Pilot Scale Investigation of Sustainable BTEX Removal with A Compost Biofilter", *Proc. Air & Waste Manage. Assoc.*, 89th Annual Meeting & Exhibition

Webster, T.S. and Devinnny, J.S. (1998), "Biofiltration" in "Encyclopedia of Environmental

Analysis and Remediation" edited by Meyers, R.A., John Wiley & Sons, Inc., Vol.2, pp.653-665

Wright, W. F., Schroeder, E. D., Chang, D.P.Y. and Romstad, K. (1997), "Performance of a Pilot-Scale Compost Biofilter Treating Gasoline Vapor", *Env. Eng., Jun.*, pp.547-555