

MEK 제거를 위한 바이오필터용 담체의 선택

¹정 귀 택 · ^{1,5}이 광 연 · ¹이 경 민 · ^{1,2}선우 창 신 · ²이 우 태 · ⁶정 승 호
⁷차 진 명 · ⁷장 영 선 · † ^{1,2,3,4}박 돈 희
전남대학교 ¹생명과학기술학부, ²응용화학공학부, ³생물공학연구소, ⁴촉매연구소
⁵동아인재대학 안광학과, ⁶한국화학시험연구원, ⁷비앤이테크(주)
(접수 : 2005. 4. 18., 게재승인 : 2005. 12. 9.)

Selection of Biofilter Support for Removing MEK

Gwi-Taek Jeong¹, Gwang-Yeon Lee^{1,5}, Kyoung-Min Lee¹, Chang-Shin Sunwoo^{1,2}, Woo-Tae Lee², Seong-Ho Jung⁶
Jin-Myoung Cha⁷, Young-Seon Jang⁷, and Don-Hee Park^{1,2,3,4†}

¹School of Biological Science and Technology, ²Faculty of Applied Chemical Engineering, ³Biotechnology Research Institute,

⁴Research Institute for Catalysis, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

⁵Department of Ophthalmic Optics, Dong-A College, Jeonnam 526-872, Korea

⁶Korea Testing and Research Institute for Chemical Industry, Gwangju 506-301, Korea

⁷B & E Tech Co., Ltd., Business Incubator Center, Gwangju University, Gwangju 503-703, Korea

(Received : 2005. 4. 18., Accepted : 2005. 12. 9.)

The aim of this study is the development of biological removal process of methyl ethyl ketone (MEK) in odor gas, which is generated from the waste food recycling process. To develop the removal process of odor gas, MEK, the selection of proper biofilter support was carried out. When the biofilter equipment was passed by synthetic odor gas composed of 250 ppm of MEK, the maximum removal was achieved to 586.6 g-MEK/m³·hr for polypropylene fibril as support. Under the same experimental conditions, the maximum removal in polyurethane support was obtained to 359.7 g-MEK/m³·hr. Finally, the maximum removal in volcanic stone support was 56.2 g-MEK/m³·hr.

Key Words : Biological treatment, odor, biofiltration, fibril form matrix

서 론

최근 들어 산업화·도시화와 함께 날로 증가하는 환경오염 문제로 인해 악취 문제는 소음과 함께 가장 보편적인 민원대상이 되고 있는데, 정유공장, 화학공장, 하수처리장, 분뇨 및 축산폐수처리장, 매립장 등의 장소를 중심으로 악취가 문제가 되고 있다. 이러한 악취 가운데에는 단순히 불쾌감이나 혐오감을 주는 물질 뿐만 아니라, 인체의 건강에 직접적인 위해를 줄 수 있는 휘발성 유기화합물 등의 유해 물질과 함께 존재하는 것이 일반적이라는 점에서 악취 문제의 심각성이 있다. 악취물질을 제거할 수 있는 악

취 처리 기술을 분류하면 크게 물리적 방법, 화학적 방법, 그리고 생물학적 방법으로 구분할 수 있다. 이들 기술 가운데 악취발생원에서 배출되는 악취성분의 조성 및 농도, 온도, 풍량, 습도, 작업시간, 공정변화, 작업동선, 설치면적, 2차 오염, 처리대책, 사용연료 등 각종 데이터를 종합적으로 검토하여 가장 경제적이고 효과가 큰 악취 제거방법을 선택하게 된다(1, 2).

미생물을 이용한 생물학적 처리 방법은 배출가스 중에 함유되어 있는 각종 성분을 제거하는 기술로 구미에서는 악취제거, 그리고 유해 염소계 화합물의 처리장치로 사용되어 화학 공장, 식품 공장, 인쇄 공장, 사진 film 공장, 향료 공장, 목재 가공 공장, 하수 처리장 등 폭넓은 분야에 적용되고 있다. 생물학적 처리 방법은 다른 공법과 비교해 보면 운전비가 매우 저렴하며 운전관리가 간단하고 2차 오염의 염려가 없다는 특징이 있다(3).

가스상 오염 물질의 생물학적 처리 방법은 미생물의 분해 작용을 이용하는 것으로 산화반응 및 환원작용을 통해 오염 물질을 이산화탄소 (CO₂), 물 (H₂O) 그리고 유기 바

The first two authors contributed equally to this work.

† Corresponding Author : School of Biological Sciences and Technology, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

Tel : +82-62-530-1841, Fax : +82-62-530-1909

E-mail : dhpark@chonnam.ac.kr

이오매스로 전환시키는 공정이다. 즉, 악취가스는 공기 (O₂)와 함께 미생물이 부착된 미생물 담체층을 통과하면서 생물막 (biofilm)에 확산되고, 이때 악취가스는 미생물에 의해 분해된다. 일반적으로 적용이 잘되는 가스상의 물질은 분자량이 작고, 물에 대한 용해도가 높은 단일결합 구조의 물질이며, 알콜류, 알데히드류, 케톤류 그리고 간단한 방향류 화합물 같은 유기 물질과 황화수소 (H₂S)와 암모니아 (NH₃) 같은 무기 물질도 처리 효율이 상당히 높다(4, 5).

미생물을 이용한 생물학적 처리법으로는 바이오 필터 (biofilter), 바이오트리킹 필터 (biotrickling filter), 바이오 스크러버 (bioscrubber), 그리고 최근에 막을 이용한 방법 등으로 나뉘어지는데, 산정기준으로는 처리대상 오염물의 기액 분리계수와 공정상에 요구되는 공정제어의 정도, 그리고 경제성 등을 들 수 있다(3, 6, 7).

바이오필터는 악취물질을 생물학적으로 처리하는 방법 중의 하나로서, 미생물을 다공성의 담체에 고정화시켜 미생물의 대사활동에 의해 악취물질을 분해, 이산화탄소, 그리고 무해한 염으로 분해하는 환경 친화적이고 경제적인 처리공법이다. 바이오필터는 혼합 미생물군의 화학물질 분해능력을 이용하여 제거하는 기술로서, 두 가지 연속적인 분해과정으로 간단히 설명할 수 있다. ① 악취를 함유한 증기나 공기가 충전제 담체의 입자표면에 형성된 생물막에 흡수, 흡착되는 과정과 ② 산소이용과 함께 흡수, 흡착된 물질이 생물막 내부로 이동되어 미생물에 의해 분해되는 과정이다. 처리하고자 하는 대상 화합물은 알콜, 에테르, 알데히드, 케톤, 방향족, 아민류, 황화합물 등 다양한 유기성 무기성 물질들을 포함한다. 다만, 염소화합물의 처리효율이 낮은 단점이 있다(8, 9).

악취를 제거하기 위한 바이오 필터 시스템은 큰 표면적, 한계 역압력, 적당한 부착표면을 가지고 있는 충전 담체의 선택이 중요하다. 또한, 담체는 적절한 체류시간의 유지와 미생물의 성장에 필요한 수분 및 기질의 보유, 담체층 내부구조의 유지를 위한 기계적인 지지체 역할로서 바이오 필터에서 중요한 항목 중의 하나이다. 일반적으로 담체는 일정한 공간 내에서 미생물들이 연속적으로 가스의 산화반응을 수행할 수 있도록 하는 큰 비표면적, 높은 흡수율과 기공율을 가진 생물친화적인 것이 바람직하다. 담체 입자의 크기는 보통 적당한 흡착표면과 수용할 수 있는 흐름의 저항을 모두 공급할 수 있는 크기이어야 한다. 담

체의 종류는 토양, 퇴비, 점토, 탄소입자, 불활성 합성 충전물질 또는 그것들의 결합물질 등이 있다. 최근에는 합성유, 무기 결합물질로서 제조된 담체를 많이 사용하고 있으며, 이는 기존에 사용해 왔던 담체보다 층의 다공성 유지 및 미생물의 노화효과에 보다 안정적이며, 높은 처리효율을 가지고 있어 많이 사용되고 있다. 다공성 담체로는 활성탄, 토탄 등의 천연재료와 플라스틱이나 셀룰로오스와 같은 유기재료, 그리고 세라믹과 같은 무기재료 등으로 다양하게 이용되고 있다. 그러나 활성탄이나 토탄을 사용하는 방법들은 초기 흡착에 의한 제거효과는 우수하나 충전탑 내에 충전시킨 후 시간의 경과에 따라 탄화 및 압밀에 의한 압력손실이 증가하여 흡착효능이 감소되는 단점이 있고, 유기재료의 경우 미세구조의 제어가 용이하고, 미생물의 고정화 특성이 우수한 반면 질상으로 인한 압력손실이 크며 장기간 사용시 담체 자체의 팽윤이나 자화에 의해 담체의 특성이 변질되고, 경제성 측면에서도 무기물에 비해 불리하다(4). 이에 반해, 무기재료 특히, 세라믹스는 내화학성과 강도가 우수하여 장기간 사용에도 변질과 변형이 없으며, 큰 비표면적의 다공성 담체를 제조하기 용이한 장점을 가지고 있다. 최근에는 무기 담체 중에 섬유상 담체도 바이오 필터의 새로운 미생물 고정화 담체의 대안으로 많이 이용되고 있다. 따라서 보다 소형으로 경제적이면서도 효과적인 담체를 제조하기 위해서는 무엇보다도 활성이 우수한 미생물을 다량으로 담지, 유지할 수 있는 담체를 사용하는 것이 중요하다(Table 1)(10).

담체 충전형 미생물 악취제거법은 기존의 액액세정법 등 물리화학적인 악취제거방법과 비교하여 경제성과 악취제거 성능이 우수한 새로운 악취제거기술로 주목되고 있다. 이 방법은 악취제거 미생물이 부착된 담체를 일정형태의 탑 내에 충전하고 여기에 제거하고자 하는 악취가스를 통과시켜 담체에 고정화된 미생물과 악취가스의 반응을 유도하는 방법이다. 이때 미생물들은 악취가스를 유기산과 이산화탄소로 분해시키며, 여기서 발생하는 에너지를 이용하여 성장과 증식을 계속하게 된다. 충전탑식 미생물 악취제거에서 악취제거 효율을 좌우할 수 있는 중요한 인자는 탑 내의 단위 체적당 미생물 빈도수를 어느 정도까지 최대화할 수 있는나 하는 것이며, 이를 위해서는 비표면적이 큰 담체를 이용해야만 가능하다(11). 본 연구에서는 경제성과 우수한 기공률, 흡착성, 흡수성을 지닌 고강도의 미생

Table 1. Main properties of biofilter matrix

	Compost	Peat	Soil	Activated carbon, perlite, different nonactive material	Synthetic (PE, PP, PU, silica)
Microorganism density	High	Medium-low	High	None	None
Surface area	Medium	High	Low-medium	high	High
Air permeability	Medium	High	Low	Medium-high	Very high
Absorption of nutriment	High	Medium-high	High	None	None
Adsorption of pollutant	Medium	Medium	Medium	Low-high	None to high Very high
Life span	2-4 years	2-4 years	> 30 years	> 5 years	> 15 years
Cost	Low	Low	Very low	Medium-high	Very high
Application	Easy, cost effective	Medium, water control problems	Easy, low-activity biofilters	Need nutrient, maybe expensive	Prototype only or biotrickling filter

물 친화성 담체를 선별하여 사용하기 위하여 서로 다른 특성을 지닌 담체 소재를 선정하고, 이들 소재의 바이오필터로 담체 성능을 조사하였다. 바람직한 담체가 가져야 할 특징들은 ① 적절한 미생물 성장환경 제공, ② 큰 비표면적의 확보, ③ 구조적 안전성, ④ 수분 유지능력, ⑤ 공극률, ⑥ 낮은 겉보기 밀도 등이다(2, 12). 바이오필터의 주요 설계 및 운전 인자로는 미생물, 담체, 수분 함량, pH, 유입 가스 조건, 영양 물질의 영향, 그리고 반응기내의 체류시간 등의 인자들에 의해 바이오필터의 성능이 좌우된다. 이 중 바이오필터 담체별 반응기 운전 기본 실험인자로는 사용되는 체류시간 (empty bed contact time, empty bed residence time, empty bed retention time; EBCT, EBRT)은 충진층 부피에 대한 유량의 함수이다. EBCT는 오염된 가스의 실제처리시간을 과대평가하여 나타낼 수 있으나, 계산의 용이성으로 통상적으로 사용되는 인자이다. 다른 바이오필터 또는 부하조건으로 운전되는 동안 바이오필터의 가스체류시간을 비교할 수 있으며, 충분한 EBCT는 물질전달과 생물학적 분해를 가능하게 하기 위해 필수적이다. 또 다른 중요인자 중 하나인 유입부하량은 충전물질의 단위 부피당 단위시간당 시스템으로 유입되는 유해가스($\text{g/m}^3 \cdot \text{hr}$)로 정의된다. 즉, 제거속도는 유입량과 제거효율에 따라 결정되어지는 것으로 바이오필터를 설계하는데 있어서 매우 중요한 인자이다(13).

본 연구에서는 유입유량 변화, 즉 체류시간 변화에 따른 악취 가스제거 특성을 알아보기 위해 담체별 제거특성은 MEK를 대상으로 일정한 유입농도 하에서 유입유량을 단계적으로 증가시키면서 최적의 바이오필터용 담체를 선정하고자 하였다.

재료 및 방법

실험균주 및 배지

본 실험에 사용한 균주는 광주시 소재 전자공장의 하천 및 주변토양 및 울산, 온산 등의 공업단지 오염 토양으로부터 분리한 균주 3종 (*Pseudomonas* sp. TKC, *Pseudomonas* sp. AKC, 그리고 *Geotrichum* sp. MKC)과 *Thiobacillus* sp. IW를 혼합 배양하여 악취제거에 바이오필터 식중에 사용하였다(14). 균주의 배양에 사용한 배지는 NH_4Cl 1.0 g/L, K_2HPO_4 4.35 g/L, NaH_2PO_4 3.9 g/L, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 7.2 g/L, CaCl_2 0.45 g/L, FeSO_4 0.45 g/L, MnCl_2 0.45 g/L, CuCl_2 0.45 g/L, NaMoO_4 0.45 g/L의 조성으로 배지를 조성하여 pH를 7.0으로 조정된 뒤, 121°C, 1.5 atm에서 20분간 멸균하여 사용하였다. 또한, 바이오필터에 공급한 영양배지로는 Minimal Salt Medium (MSM : KH_2PO_4 1.50 g/L, Na_2HPO_4 6.00 g/L, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 3.00 g/L, MgSO_4 0.05 g/L, CaCl_2 0.01 g/L; pH 7.0)을 사용하였다. 실험에 사용한 모든 시약은 시약급을 사용하였다.

처리대상 악취가스

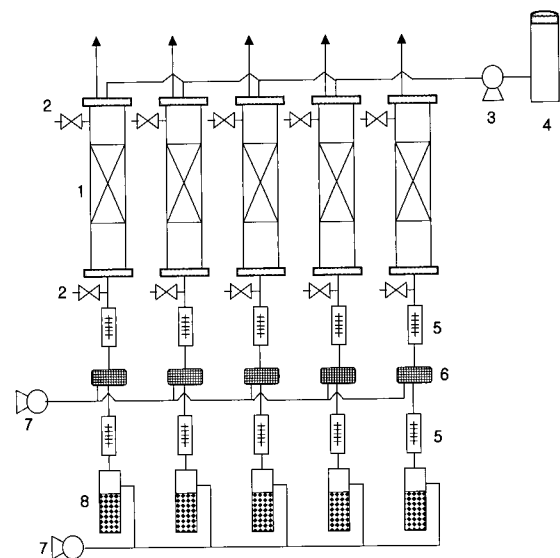
본 연구에서 처리하고자 하는 대상물질은 음식물 재활용 시설에서 발생하는 악취가스 중, 상대적으로 높은 농도

인 MEK를 처리 대상으로 하였다. 일정농도의 악취를 공급하기 위하여 공기발생기에서 발생된 공기는 가습기 (humidifier)를 통과시킨 후 반응에 적절한 온도로 조정되어 각각의 담체가 포함된 바이오필터에 공급해 주었다. 각 바이오필터 반응기의 체류시간 (EBCT)은 생물막의 성장을 촉진하기 위해 60초에서 5초 사이로 조절하였으며, inlet loading ($\text{g/m}^3 \cdot \text{hr}$)를 조정하여 주었다.

바이오필터 구성 및 운전

바이오필터 반응기 구성 및 사용 담체

본 연구에서 사용된 바이오필터 반응기의 구조는 Fig. 1에 나타내었고, 재원은 다음과 같다. 반응기는 바이오필터 반응기 1~5 반응기까지로 되어있는 아크릴 반응기 (ID 9.4 cm, bed length 25 cm)로 담체 시료 채취를 위한 직경 2 cm의 시료 채취구가 2군데 있으며, 상부에서 시료채취가 가능하도록 되어 있고, 하부에는 담체층의 지지를 위하여 다공판을 설치하였다. 또한 바이오필터 반응기 1~5는 25~35°C의 실온에서 운전하였다. 배출가스 중에 남은 악취를 제거를 위해 배출가스를 NaOH 흡수액에 통과시킨 후 최종 배출하였다. 반응기는 물을 이용하여 역세정이 가능하도록 장치되었으며, 주입공기는 반응조 하부에서 들어와서 반응조 상부로 나가도록 되어있으며, 영양물질은 반응기내에 고르게 공급되도록 담체층 상부에 설치된 노즐에서 분사된다. 반응기는 2~4 hr마다 수분을 공급하였으며, 영양분도 공급하기 위하여 별도의 영양분 공급조를 두었으며 반응기는 상향류식 반응기이다. 이들 반응기는 모두 하부에 침출수를 위한 배출구를 가지고 있으며, 처리대상 악취 물질의 농도는 MEK가 일정량 들어있는 bubble column 형식의 용기에 공기를 MFC와 flowmeter를 이용 공급하여 일정 농도의 MEK 가스를 발생시켜 반응기에 연속적으로 주입하였다. 시료채취는 반응기 상부와 하부, 그리고 각 부분에 설치된 시료채취구에서 채취하여 분석하였다.



1. Biofilter reactor, 2. Check valve, 3. Water pump, 4. Nutrient tank, 5. MFC, 6. Mixing chamber, 7. Air compressor, 8. Target gas generator

Figure 1. Scheme of biofilter reactor.

본 연구에서 사용된 담체는 PP계열인 섬유상 바이오필터 담체이며, 비교 대상의 담체로는 폴리우레탄, 화산석을 담체로 사용하였다. 또한 유입가스 농도를 비교하고자 2개의 비교 실험장치를 두었다.

각각의 바이오필터 실험용 담체별 특성은 Table 2에 나타내었고, 담체에 멸균된 각각의 미생물 접종균 500 mL씩 접종한 후 반응을 수행하였다. 또한 담체의 pH를 중성으로 만들기 위해 1 M potassium phosphate buffer (pH 7.0)를 이용하였고, 60~90%의 함수율로 맞추어 사용하였다(15). 이들 반응기의 운전 조건을 요약해 보면 Table 3과 같다.

Table 2. Characteristics of experimental matrix of biofilter

	Polyuretan	Fibriform	Volcanic stone
Weight (g)	103.1	101.7	110.0
Volume (cm ³)	452.0	456.0	465.2
Packing ratio (% , v/v)	56.3	56.5	57.1

Table 3. Operating conditions of biofilter

Operating parameter	Reactor 1 (PU)	Reactor 2 (Fibriform)	Reactor 3 (Volcanic stone)
Bed volume (L)	0.8	0.8	0.8
SV (1/h)	120-720	120-720	120-720
EBCT (sec)	60-10	60-10	60-10
Inlet air flowrate (L/min)	1.6~4.8	1.6~4.8	1.6~4.8
Temperature in bed (°C)	25-35	25-35	25-35
Initial concentration (ppm)	25	25	25
Maximum concentration (ppm)	750~900	750~900	750~900

담체의 압력강하 측정

바이오필터의 균주 과밀화에 따른 압력강하 측정 반응기는 직경 8 cm, 높이 100 cm의 원형 아크릴 반응기로 섬유상 담체를 포함한 비교 담체의 충전층 높이는 50 cm로 하여 조사하였으며, 담체 중 입자의 크기는 5~15 mm가 되도록 사용하였다. 바이오필터 반응기의 유량은 6.03~51.26 L/min로 변화시켜 이때의 압력강하 (mmH₂O)를 마노미터를 이용하여 각각의 실험에 대해 수분 함유율이 충분히 유지될 때 압력강하 측정을 수행하였다.

분석방법

악취 농도는 각각의 시료 채취구에서 10 mL의 기체시료를 Hamilton gas tight syringe로 채취후 실리콘 마개된 15 mL glass tube에 포함된 1 mL의 메틸렌클로라이드에 주입하여 분석하였다. GC 분석조건은 DB-WAX (30 m × 0.53 mm × 1 mm) 칼럼을 사용하고, 시료의 양은 2 µL로 도입부 온도는 150°C, 오븐 온도는 50°C, 검출기의 온도는 200°C로 설정하였다. 운반 기체로는 헬륨가스 (99.9995%)를 검출기의 혼합공기와 수소는 각각 400, 40 mL/min으로 유지하였으며, 칼럼 유속은 8 mL/min 으로 분석을 설정하여 수행하였다. 또한 입구농도는 Gas Teck사의 검지관을 사용하였다.

처리효율과 제거용량

처리효율 (removal efficiency)과 제거용량 (elimination capacity)은 바이오필터의 처리능력을 설명하는 값으로 처

리효율은 바이오필터에 의해 제거되는 오염물질 비율이며 %로 나타낸다. 제거용량은 단위시간당 충전층 부피에 대한 오염물질의 제거량을 나타내는 값이다.

$$RE = 100 \times (C_{Gi} - C_{Go}) / C_{Gi}$$

$$EC = (C_{Gi} - C_{Go}) \times Q / V_f$$

C_{Gi} : inlet gas concentration

C_{Go} : outlet gas concentration

결과 및 고찰

바이오필터 담체별 특성을 조사하기 위하여 폴리우레탄, 섬유상 및 화산석 담체를 이용한 바이오 필터 담체들의 성능과 담체 재료를 대상으로 MEK에 대한 처리 정도를 조사하였다.

유입농도 변화에 따른 담체별 MEK 제거

폴리우레탄 바이오필터 담체에 의한 유해가스 제거에는 먼저 MEK를 20 ppm 미만의 저농도에서 4일간 적응시킨 후 바이오필터의 유입유량을 4.8 L/min와 SV 360/hr으로 일정하게 유지하면서 초기 MEK의 유입농도를 25 ppm으로 공급하였고, 단계적으로 1주일마다 MEK 유입농도를 50, 150, 250, 400, 600, 750 ppm으로 증가하면서 반응 시간에 따른 유입, 유출 농도 및 제거효율의 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 폴리우레탄 바이오필터 담체는 400 ppm까지는 MEK를 약 95% 이상 제거하였다. 그러나 유입농도 600 ppm에서는 유출농도가 약 51.5 ppm으로 증가하여 제거효율은 91.4%로 감소하다가 750 ppm에서는 제거율이 54% 미만으로 감소하였다. 다시 농도를 낮추고 적응 시간을 갖은 후 유입 농도가 낮일 경우 제거효율이 다시 회복되었고, 유입농도를 증가시킬 경우 다시 제거효율이 감소하는 유사한 결과를 나타내었다. MEK의 최적 제거 용량은 Fig. 5에 나타낸 것처럼 343.9 g/m³ · hr으로 나타났다.

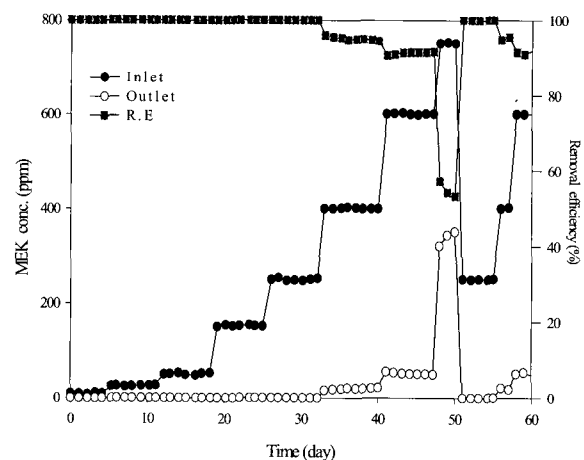


Figure 2. MEK removal pattern at constant air flow rate and varying inlet concentrations.

섬유상 바이오필터 담체에 대한 각각의 유출가스에 연구에서는 MEK를 먼저 20 ppm 미만의 저농도에서 4일간 적응시킨 후, 바이오필터의 유입 유량을 이전의 담체 실험 조건과 같이 4.8 L/min와 SV 360/hr으로 일정하게 유지하면서 초기에 MEK의 유입농도를 25 ppm으로 공급하였으며, 단계적으로 1주일마다 MEK 유입농도를 150, 250, 400, 600, 750 ppm으로 증가시키면서 반응시간에 따른 유입, 유출 농도 및 제거효율의 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

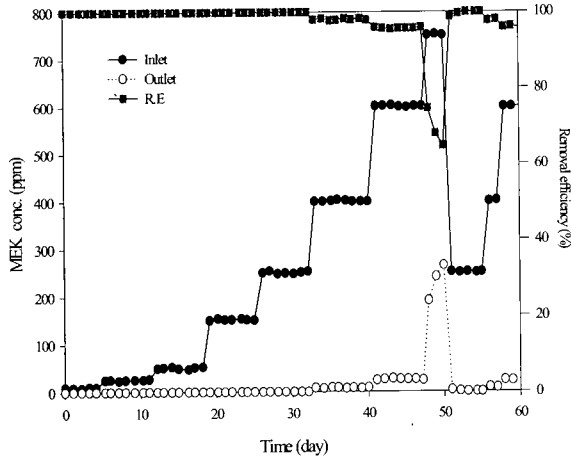


Figure 3. MEK removal pattern at constant air flow rate and varying inlet concentrations.

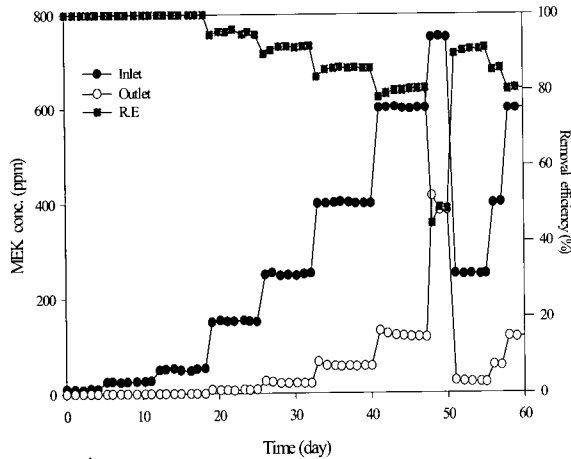


Figure 4. MEK removal pattern at constant air flow rate and varying inlet concentrations.

섬유상 바이오필터 담체는 폴리우레탄 바이오필터 담체에 비해 비교적 높은 농도인 400 ppm까지는 유출가스 내에 MEK가 98% 이상의 제거효율을 나타내었다. 그러나 유입농도 600 ppm에서는 유출농도가 약 25 ppm으로 제거효율은 96%로 감소하다가 750 ppm에서는 제거율이 67% 미만으로 감소하였다. 따라서 다시 농도를 낮추고 재적응 시간을 가진 후 유입 농도를 높일 경우 폴리우레탄 바이오필터 담체와 유사한 결과를 나타내었다. 본 연구 조건에서는 합성물질 계열의 담체 가운데는 섬유상 담체가 폴리우레탄 바이오필터 담체보다 바이오필터 담체로 우수하다고

판단되었다. 이는 MEK 유입 농도에 따른 섬유상 담체의 최대 제거 용량은 $366.8 \text{ g/m}^3 \cdot \text{hr}$ 로 합성물질 담체인 폴리우레탄 담체($343.9 \text{ g/m}^3 \cdot \text{hr}$)의 최대 제거용량을 비교해보면 섬유상 담체가 다소 우수함을 알 수 있었다(Fig. 5). 결과적으로 저농도 뿐만 아니라, 고농도까지 비교적 넓은 범위의 MEK 농도 조건에서 합성물질인 섬유상 담체를 이용하면 악취가스를 효과적으로 처리할 수 있으며, 미생물의 단계적인 농도 증가에 대한 제한 농도 범위까지는 미생물의 저해효과 없이 안정적 처리가 가능함을 알 수 있었다. 또한 급격한 농도변화에 대해 제거효율이 단기간 내에 회복됨으로써 어느 정도 충격부하에 안정적으로 처리할 수 있을 것으로 사료된다.

화산석 바이오필터 담체를 이용한 MEK 제거에서 MEK 농도를 10 ppm 이내의 저농도에서 4일간 적응시킨 후, 바이오필터의 유입유량을 4.8 L/min와 SV 360/hr으로 일정하게 유지하면서 초기에 MEK의 유입농도를 25 ppm으로 공급하였으며, 단계적으로 1주일마다 MEK 유입농도를 50, 100, 150, 250, 400, 600, 750 ppm으로 증가시키면서 얻은 반응시간에 따른 유입, 유출 농도 및 제거효율을 Fig. 4에 나타내었다.

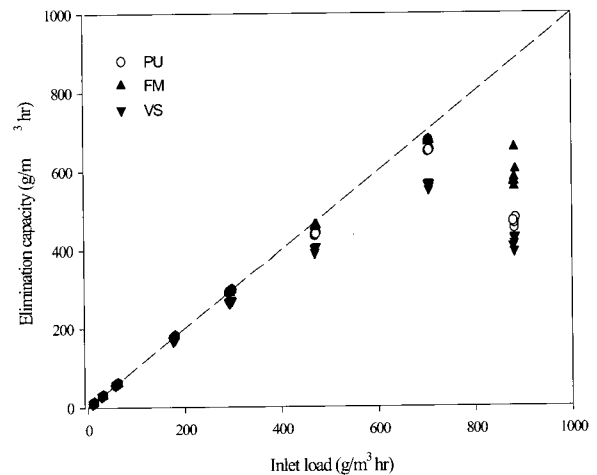


Figure 5. Inlet load vs. elimination capacity of MEK at varying media.

화산석 바이오필터 담체는 합성물질 계열의 섬유상, 폴리우레탄 바이오필터 담체에 비해 비교적 낮은 농도인 150 ppm까지 유출가스 내에 MEK가 95% 이상으로 이전의 담체에 비교하여 제거효율이 낮게 나타났다. 유입농도 250~600 ppm 범위에서는 유출농도가 약 26~139 ppm으로 제거효율이 92~80% 사이로 유지되다가, 750 ppm에서는 제거율이 47% 미만으로 감소하였다. 따라서 화산석 담체를 이용한 MEK 최대 제거 용량은 $167.7 \text{ g/m}^3 \cdot \text{hr}$ 로 계산되었다(Fig. 5). 다시 농도를 낮추고 재적응 시간을 갖은 후 유입 농도를 높일 경우 합성물질 계열의 담체와 유사한 결과를 나타내었다. 이는 섬유상 담체와 비교할 때 화산석 바이오필터 담체가 섬유상 담체보다 바이오필터 담체로서 성능이 저하됨을 나타내었다.

결론적으로 일정한 유량에서 유입 농도 변화에 따른 담

체 종류별 악취가스에 대한 제거율은 섬유상 > 폴리우레탄 > 화산석 순으로 담체의 우수성이 나타났다. 이들 담체 종류에 따른 MEK 유입 농도부하량에 대한 제거용량 비교 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 본 실험에서는 향후 바이오필터를 이용한 악취가스 제거에 섬유상 담체를 바이오필터의 담체 소재로 사용하는 것이 타당하리라 사려된다.

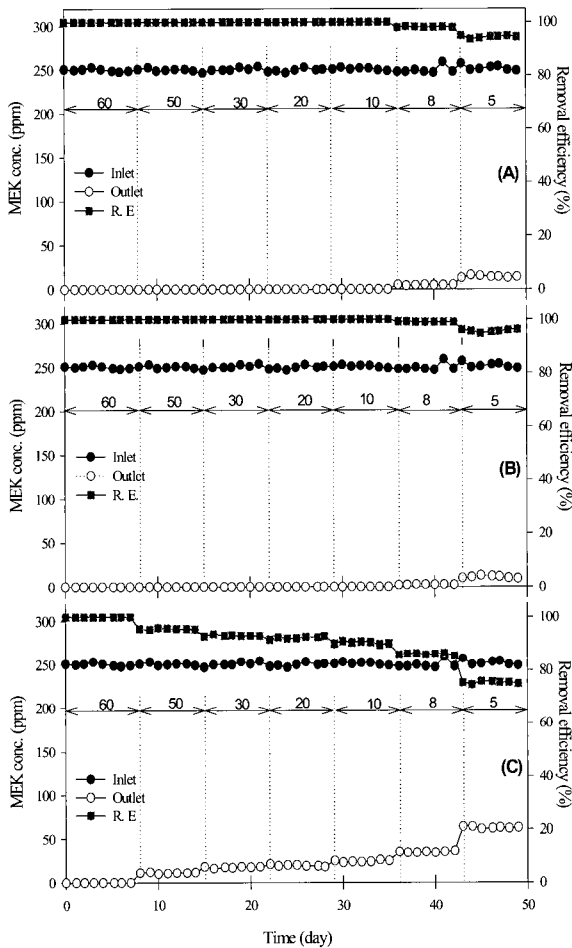


Figure 6. MEK removal pattern at constant inlet concentration and varying flow-rate (EBCT). A: PU, B: FM, C: VS.

유입 유량 변화에 따른 담체별 MEK 제거

각종 산업 현장에서 발생하는 악취가스 성분은 농도와 유량이 다양하며, 고농도의 저유량으로 발생하는 악취에 대해 물리·화학적 처리방법도 안정된 처리효율과 경제성을 갖는다. 그러나 저농도의 고유량으로 발생하는 경우는 기존의 물리·화학적 방법으로 처리시에는 효율에 비해 비용의 급격한 증가를 초래한다. 이에 바이오필터는 저농도, 고유량에 적합하며, 경제적으로 짧은 체류시간에도 안정된 제거효율을 유지하여야 한다. 체류시간은 여러 가지 변수가 사용되고 있으나, 주로 반응기 충전부피를 유량으로 나눈 체류시간과 이의 역수인 공간속도를 사용한다. 같은 처리장치를 사용하더라도 충전재의 종류와 충전방법 등에 의해 공극율이 달라지며, 따라서 실제체류시간도 변하게 되므로, 상대적인 비교를 위해서는 공극율과 무관하게 반응기의 체적만을 고려하는 체류시간을 사용하게 된다.

따라서 가스 체류시간은 충전물질의 부피를 가스 유입유량으로 나눈 값이다. 가스 체류시간의 정의에서 알 수 있듯이 가스 체류시간에 영향을 미치는 인자는 2가지이다. 먼저 가스 유입유량이 일정할 경우에는 반응기 부피가 커질수록 (즉, 반응기 단면적이 일정하므로 충전물질 높이가 증가할수록) 가스 체류시간이 증가하며, 반대로 반응기의 부피 (또는 충전물질 높이)가 일정할 경우에는 가스 유입유량을 증가시킬수록 가스 체류시간은 감소하게 된다. 충전물질 높이가 높아질수록 처리 효율은 증가하지만, 바이오필터 시설규모도 커지는 단점이 있으므로, 충전물질 높이 변화에 의한 가스 체류시간 변화가 처리효율에 미치는 영향을 조사하여야 한다(13). 본 연구에서도 유입유량 변화, 즉 체류시간 변화에 따른 악취 가스 제거 특성을 알아보기 위해 담체별 제거특성은 MEK를 대상으로 일정 유입농도로 정하고 유입유량을 단계적으로 증가시키면서 연구를 수행하였다. 실험에 사용한 담체 충전체적은 800 cm³로 수행하였다. 따라서 바이오필터에 대한 최대 제거용량은 바이오필터 미생물 활성도에 대한 저해작용 없이 견딜 수 있는 최대 부하율이며, 유입부하율과 같은 단위를 사용한다. 이러한 두 변수는 시스템의 운전조건 및 충전재의 종류에 따라 달라지며, 실제 바이오필터 설계시 운전상의 핵심적인 역할을 수행하는 것으로 알려져 있다(11, 13).

본 연구에서는 최대 제거용량은 95% 이상의 제거효율을 나타내는 것을 최대 유입부하량 또는 유입부하량에 대한 제거용량 그래프에서 최대 제거용량으로 나타내었다. 따라서 섬유상 담체는 inlet load가 400 g/m³·hr 이상이 되어도 비포화영역으로 남았지만, inlet load가 증가하여도 제거용량이 400 g/m³·hr 이상을 넘지 않는 포화하였다. 즉, inlet load가 증가할 때 제거용량이 감소하는 영역이 나타났으며, 이는 미생물이 고농도 유입으로 저해작용을 입는 것으로 판단하고 여기서는 inlet load가 감소하는 영역에 속한다.

폴리우레탄, 섬유상, 그리고 화산석 바이오필터 담체에 각각 250 ppm의 MEK 농도에 대한 유입 유량 증가에 따른 체류시간을 0~60 sec로 변화시키면서 얻은 결과를 Fig. 6에, 그리고 체류시간 변화에 따른 제거효율과 제거 용량을 Fig. 7에 나타내었다. 폴리우레탄과 섬유상 바이오필터 담체를 적용한 경우에는 체류시간이 감소해도 MEK의 제거에는 큰 영향을 미치지 않았으나, 화산석 담체를 적용한 경우에는 체류시간의 감소에 민감하게 MEK의 제거율이 낮아짐을 알 수 있었다. 폴리우레탄 담체의 MEK 250 ppm 유입농도 및 유량변화에 대한 실험 결과로부터 산정된 최대 제거용량은 359.7 g-MEK/m³·hr이었으며, 섬유상 담체의 MEK 250 ppm 유입 농도 및 유량변화에 대한 실험 결과로부터 산정된 최대 제거용량은 586.6 g-MEK/m³·hr로 나타났다. 그리고 화산석 담체의 MEK 250 ppm 유입 농도 및 유량변화에 대한 실험결과로부터 산정된 최대 제거용량은 56.2 g-MEK/m³·hr로 나타났다.

바이오필터의 담체 선정에 위하여 각 담체별 특성을 보면 유입, 유출 농도는 초기에는 미생물의 부착 및 순응을 위하여 낮은 부하 조건에서 운전하고, 유입부하가 체류시간 10 sec인 경우에 합성물질인 폴리우레탄 및 섬유상은 유입 부하량이 100% 제거율로 나타났으며, 화산석은

90~92%로 제거효율로 차이를 보였다. 이러한 결과는 바이오필터 담체에서 보여지는 바와 같이, 섬유상의 경우가 비표면적이 다른 담체들인 폴리우레탄이나 화산석과 비교하였을 때보다 미생물의 부착할 수 있는 공간이 크기 때문인 것으로 사료된다. 위의 결과를 종합해보면, 섬유상 담체는 폴리우레탄, 화산석 담체와 비교하여 몇 가지 장점을 가지고 있다. 높은 흡착능으로 인하여 물리·화학적 제거능이 뛰어나며 충격부하에도 강한 면을 보인다. 또한, 미생물에 의한 충전물질 자체의 분해가 없으므로, 충전재료의 수명이 길며, 통기성이 좋아 압력손실이 낮은 점 등이 있다.

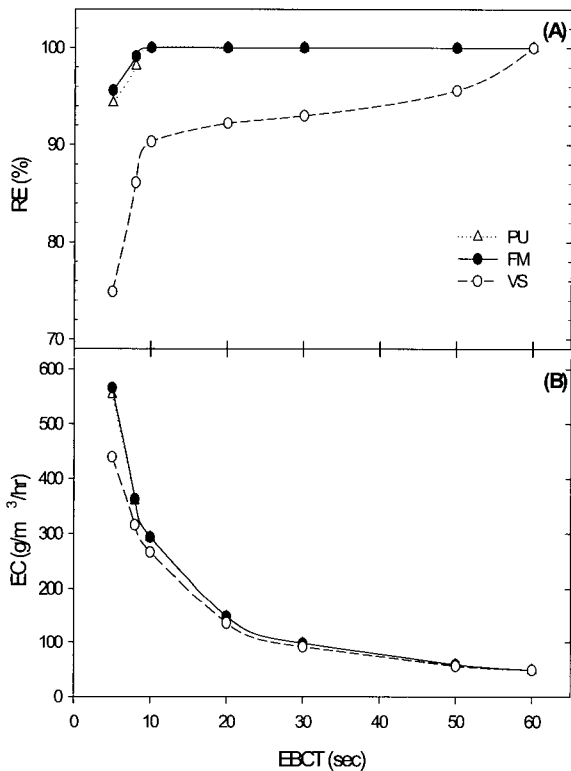


Figure 7. Elimination capacity to change of PU, fiber matrix and volcanic stone input loading (A: Removal efficiency, B: Elimination capacity).

담체별 압력손실

담체의 변화가 압력손실을 증가시키는 원인은 여러 가지가 있다. 하나는 충전물질 내에 미생물이 과도하게 증식하여 공극을 폐쇄하기 때문이며, 다른 하나는 수분이 다량 함유된 충전물질 자체가 중력에 의하여 가라앉아 압밀이 일어나는 경우이다. 이밖에 외부 운전인자로는 유속을 증가시킬 경우에도 압력손실이 증가한다. 바이오필터 담체로서 유기성 담체 이후로 폴리우레탄과 같은 고분자 합성물질, 고로슬래그와 같은 무기성 폐자원, 규조토나 플라이에 시와 같은 세라믹 등이 개발되고 있다. 특히 악취 가스 제거에는 합성물질 계열을 사용하고, 악취 가스 제거는 악취 가스 제거 과정 중 발생하는 생성물로서 산이 형성되는 경우 내산성 재질을 선정하여야 한다. 본 연구에서는 실험에 선정된 3가지 담체 가운데 합성물질 담체 계열인 섬유

상, 폴리우레탄의 초기 운전시에는 압력 강하가 5 mmH₂O 미만으로 화산석과 유사한 결과를 나타내었다(Fig. 8).

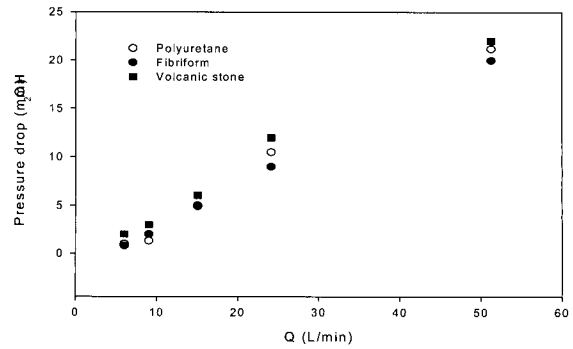


Figure 8. Pressure drop of varying media.

따라서 섬유상 바이오필터 담체의 충전 방법으로 담체 선택은 낮은 EBCT에서도 높은 제거율과 낮은 압력손실을 보여준 섬유상 담체를 대상으로 하여 바이오필터에 담체의 적절한 충전 방법에 따른 담체의 충전 특성을 선정하기 위하여 담체 충전 형태별 경제성과 사용 측면에서 용이성을 비교하였다. 섬유상 담체의 충전 방법별 유입 공간 속도에 따른 압력손실의 변화를 나타낸 것이다. 충전 방법 중 담체의 단위면적당 충전량이 크기가 클수록 압력손실은 커지며 유입 선속도가 증가할수록 압력 손실이 증가한다. 여기에서는 나타내지 않았지만 압력강하는 충전층의 높이에 따라 직선적으로 증가하며 입자의 크기가 작을수록, 가스의 유속이 빠를수록 현저하게 증가하는 결과와 일치하였다.

또한 섬유상 담체는 악취가스 제거시 생성되는 황산에 의해 녹지 않고 비교적 섬유상 표면에 넓은 표면적을 보유하므로, 화산석을 담체로 한 경우에 비해 비교적 낮은 압력손실을 나타냄으로써 고유량의 악취가스 처리시 압력손실에 의한 문제는 없을 것을 사료된다. 따라서 바이오필터 현장 설치 조건에서는 섬유상 담체의 충전 방법은 경제성과, 압력강하 및 담체에 미생물 고정화방법 등을 종합적으로 고려하여 최종 선별하여 사용하였다.

요 약

본 악취제거용 바이오필터에 필요한 담체에 대하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 합성악취가스의 조성이 MEK 250 ppm을 바이오필터에 통과시켰을 때, 폴리프로필렌 섬유상은 586.6 g-MEK/m³·hr로 실험담체 중에서 최고 제거량을 나타내었다. 폴리우레탄 담체는 359.7 g-MEK/m³·hr를 제거용량을 나타내었다. 화산석 담체의 제거량은 56.2 g-MEK/m³·hr로 평가되었다. 본 연구에서 사용한 담체 중에서 MEK 제거에 사용될 수 있는 최적의 담체로는 폴리프로필렌 섬유상 담체로 평가되었다.

감 사

본 연구는 산업자원부의 지역 석·박사 연구인력 양성사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Edwards, F. G. and N. Nirmalakjandan (1996), Biological treatment of airstreams contaminated with VOCs: an overview, *Water Science and Technology* **34**(3-4), 565-571.
2. Altaf Wani, H., M. R. Branion Richard, and K. Lau Anthony (1997), Biofiltration : A promising and cost-effective control technology for odors, VOCs and air toxics, *J. Environ. Sci. Health*, **A32**(7), 2027-2055.
3. Dragt, A. J. (1992), in A. J. Dragt and J. Van Ham, eds., *Biotechniques for Air Pollution Abatement and Odour Control Policies*, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, pp3-9.
4. Weber, F. J. and S. Hartmans (1992), in A. J. Dragt and J. van Hameds., *Biotechniques for Air Pollution Abatement and Odour Control Policies*, Elsevier, Amsterdam, pp125-130.
5. Cohen. Y. (2001), Biofiltration - the treatment of fluids by microorganisms immobilized into the filter bedding material: a review, *Bioresource Technology* **77**(3), 257-274.
6. Korea Ministry of Environment (1997), Food waste management policy, technology trends, and practice examples of its reduction and resource recovery, pp. 17-23.
7. Jorio, H. and M. Heitz (1999), Biofiltration of air, *Canadian Journal of Civil Engineering* **26**(4), 402-424.
8. Deviny, J. S., T. S. Webster, E. Torres, and S. Basrai (1995), Biofiltration for removal of PCE and TCE vapors from contaminated air, *Hazardous Waste Hazardous Mater.* **12**(3), 233-293.
9. Webster, T. S., J. S. Webster, E. Torres, and S. S. Basrai (1997), Microbial ecosystems in compost and granular activated carbon biofilters, *Biotechnol Bioeng.* **53**(3), 296-303.
10. Kommission Reinhaltung der Luft (1991), Biological Waste Gas / Waste Air Purification, Biofilters, VDI verlag, In Verein Deutscher Ingenieure ed., VDI 3477-Handbuch Reinhaltung der Luft: Band 6, p1-29, Dusseldorf.
11. Leson, G. and B. J. Smith (1997), Petroleum environmental research forum field study on biofilters for control of volatile hydrocarbons, *Journal of Environmental Engineering-ASCE* **123**(6), 556-562.
12. Swanson, W. J. and R. C. Loehr (1997), Biofiltration : Fundamentals, Design and Operations Principles, and Applications, *Journal of Environmental Engineering* **123**(6), 538-546.
13. Webster, T. S., H. H. J. Cox and M. A. Deshusses (1999), Resolving operational and performance problems encountered in the use of a pilot/full-scale biotrickling fiber reactor, *Environmental Progress* **18**(3), 162-172.
14. Jeong, G. T. et al. (2005), Isolation and characterization of odor treatment bacteria, *Kor. J. Biotechnol. Bioeng.* **20**(5), 345-349.
15. Wright, D. F. and E. D. Schroede (1997), Performance of a pilot-scale compost biofilter treating gasoline vapor, *Journal of Environmental Engineering* **123**(6), 547-555.