

악취 및 VOC를 함유한 폐가스의 바이오필터 처리: 1. 개선된 바이오필터설계에 의한 압력강하와 미생물 population 분포

이은주 · 임광희[†]

대구대학교 화학공학과, 산업 및 환경폐가스연구소
712-714 경상북도 경산시 진량읍 내리리 15
(2013년 1월 14일 접수, 2013년 1월 21일 채택)

Biofilter Treatment of Waste Air Containing Malodor and VOC: 1. Pressure Drop and Microbe-population Distribution of Biofilter with Improved Design

Eun Ju Lee and Kwang-Hee Lim[†]

Department of Chemical Engineering, Daegu University, Research Institute for Industrial and Environmental Waste Air Treatment,
15 Naeri-ri, Jillyang-eup, Kyungsan Gyeongbuk 712-714, Korea
(Received 14 January 2013; accepted 21 January 2013)

요 약

본 연구에서는 개선된 바이오필터설계를 가지는 새로운 바이오필터의 압력강하 및 미생물 population 분포 등을 관찰하고, 같은 유효부피를 갖고 unidirectional flow (UF)를 갖는 전통적 바이오필터의 경우와 비교하였다. 개선된 바이오필터는 운전 초기 또는 정상상태의 장기운전에서 전통적 바이오필터 압력강하의 약 40~80% 이상을 감소시켰다. 미생물 population 분포는 바이오필터 담체인 페타이어담체와 입상 활성탄의 두 경우 모두 바이오필터 top 단에서 가장 낮았고 바이오필터 밑으로 내려갈수록 미생물 population이 커졌다. 한편 페타이어담체는 입상활성탄 담체보다 월등히 큰 미생물 population을 나타내는 미생물 콜로니 개체수(CFU counts)를 보였다. 개선된 바이오필터에서 악취가스가 bottom→up으로 공급되는 경우에 악취가스가 top→down으로 공급되는 경우보다 미생물 population 성장이 더욱 컸으며, 입상활성탄 담체보다 페타이어담체에서 이 현상이 더욱 두드러졌다. 전통적 바이오필터와 개선된 바이오필터시스템 각각의 미생물 population 분포도를 비교하였을 때에, 개선된 바이오필터의 미생물 population은 전통바이오필터보다 입상 활성탄 담체와 페타이어담체의 경우에 각각 약 15배 및 2.5 배 만큼 더 고르게 분포되었다.

Abstract – In this study, both pressure drop and microbe-population-distribution were observed while running a novel biofilter system with improved design in which the biofilter system is composed of two, upper and lower biofilters with both equal feed-rates of up-flow and down-flow, respectively. Then they were compared with the pressure drop and microbe-population-distribution observed in a conventional biofilter of the same effective volume with unidirectional flow. The pressure drop-value of biofilter system with improved design turned out to be less at the incipient stage of run or steady-state long term operation by more than 40~80% of that of the conventional biofilter. The microbe-population-distribution was observed to be lower and higher at higher and lower column of biofilter, respectively, for both the conventional biofilter and the biofilter system with improved design. The microbe-media of waste-tire crumb showed much greater CFU counts than GAC. In the biofilter system with improved design, the bottom→up feeding of waste air showed greater microbe-population growth than the top→down feeding for both the microbe-media of waste-tire crumb and GAC. However, it was more prominent for the former than the latter. Comparing the microbe-population-distributions of both of the conventional biofilter and the biofilter system with improved design, the microbe-population of latter was distributed ca. 15 and 2.5 times more evenly for GAC and the media of waste-tire crumb, respectively, than that of former.

Key words: Biofilter System with Improved Design, Conventional Biofilter, Pressure Drop, Microbe-population-distribution, The Degree of Uniformity, Malodor, VOC

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: khlim@daegu.ac.kr

1. 서 론

바이오필터가 많은 장점을 가졌음에도 불구하고 현재 바이오필터 기술에 극복해야 할 대표적 문제는 바이오필터 내부 미생물의 편향적 분포 및 미생물 증식으로 인한 지나친 축적이다. 바이오매스는 기상 바이오필터 운전에서 중요한 인자이고, 바이오필터 내부에 미생물 바이오매스의 편향적 분포와 지나친 축적은 막힘 현상(clogging), 지나친 압력강하와 바이오필터베드 내부에 기류의 채널형성과 같은 운전상의 문제점을 초래하여 바이오필터 성능을 악화시킨다[1]. 바이오매스 축적에 대한 많은 연구가 바이오필터 베드에서 바이오매스의 더 나은 분산과 더 낮은 축적률을 통하여 안정적인 바이오필터 운전을 지속하기 위하여 수행되어 왔다[1-3]. 또한 과도한 바이오매스의 물리적, 화학적 및 생물학적 수단에 의한 제어는 지속적으로 연구되어 왔다[4-10]. 이러한 바이오필터공정에서 극복해야 할 과제는 압력강하 최소화화를 위한 바이오필터 시스템의 새로운 설계로서 극복되어질 수 있다. 변동부하(transient loading)에 대비한 개선된 바이오필터설계를 위해서 다음과 같은 연구가 이루어지고 있다. Song과 Kinney [11]는 바이오필터 운전 중에 폐가스 유입 방향을 주기적으로 상하로 방향 전환시켜주는 flow-directional-switching (FDS)을 적용하여 미생물 농도와 미생물 활성이, 폐가스 유입방향이 일정한 unidirectional flow (UF) 보다 바이오필터 길이에 따라 상대적으로 일정하였다고 보고하였다. Wright [12]는 바이오필터운전에서 unidirectional flow (UF)의 경우보다 바이오필터의 오염원 제거용량이 증가하는 flow-directional-switching (FDS)의 장점을 연구하여 정량적으로 접근하였다. Znad *et al.* [13]은 compost 담체를 충전한 바이오필터를 폐가스의 바이오필터로의 공급방향을 상향 및 하향으로 전환하는 방식으로 운전하여서 높은 톨루엔부하를 가진 폐가스를 처리하여서 바이오필터 성능향상을 보였음을 보고하였다. 한편 바이오필터 내부 미생물의 지나친 증식 또는 기타 원인에 따른 막힘 현상(clogging)으로 인한 압력강하와 바이오필터의 제거효율 감소의 연관성에 대하여 다음과 같이 연구되고 있다. Xi *et al.* [14]는 톨루엔을 포함한 폐가스처리용 바이오필터의 운전 기간 동안 과도한 미생물의 누적으로 톨루엔 제거율 감소 및 바이오필터 베드의 압력강하 증가를 보고하였는데, 바이오필터의 높이에 따른 톨루엔 농도분포는 concave한 모양에서 시간에 지남에 따라서 convex한 모양으로 변하고, 압력분포는 운전 초반부에서는 압력강하가 거의 없었으나 운전 후반부로 갈수록 바이오필터 출구 쪽보다 입구 쪽에서 압력강하가 크게 나타난 것으로 미루어 미생물이 바이오필터 입구 쪽에 더욱 누적되어 있다고 제안하였다. Mendoza *et al.* [15]은 가스상 바이오필터에 누적되어 압력강하를 유발하고 성능을 저하시키는 과도한 미생물을 제거하는 기술들을 상호 비교하였다. 가장 비효율적인 기술은 물로 채우고 빼는 방법이었으나 생물학적인 저해는 없었다. Backwashing 또는 air-sparging은 효과적인 방법이나 첨가된 화학물질에 의한 바이오필터 성능의 일시적 저하가 존재하고 7~8일 정도의 회복기간이 필요하다고 보고하였다. Hasan과 Sorial [16]은 바이오필터의 장기간 운전동안 성능유지를 위한 중요한 인자인 바이오필터 베드 내부에 과도한 미생물누적을 조절하기 위하여 backwashing, starvation 및 stagnation을 제안하고 backwashing이 바이오필터의 장기간 운전에서 stagnation보다 비효과적이고 starvation의 경우에 바이오필터의 성능이 가장 낮았다고 보고하였다. Thalasso *et al.* [17]은 압력강하가 미생물의 과도한 성장

에 의한 바이오필터의 void 부분의 폐색으로 야기되기 때문에, 압력강하가 정해진 값보다 커질 경우에 수분공급을 금하고 영양분을 제한하는 건조기간을 설정하고 압력강하가 작아지면 수분공급을 재개하는 바이오필터 운전방법을 보고하였다. Delhomenie *et al.* [18]은 톨루엔 증기를 처리하는 바이오필터에서의 막힘(clogging)에 대한 연구를 하였는데 톨루엔에 대한 최대제거용량은 90-95 g/m³/h이었고 Ergun 식을 이용하여 압력강하와 베드 porosity를 연관시켜서 정량화하였다.

본 연구에서는 바이오필터를 상하로 구분하여 처리할 오염원의 부하를 약 반씩 나누어서 독립적으로 처리하여서 바이오필터를 나누지 않을 때와 같은 체류시간을 유지하면서, 바이오필터를 나누지 않을 때보다 미생물의 분포가 바이오필터 상하로 더욱 균등하게 분포하게 되어 압력강하가 감소하게 하였다. 부연하면 지금까지의 바이오필터 연구에서 시도된 적이 없는 방법으로서 바이오필터를 상하로 나누고 처리할 폐가스 공급유량을 각각 반으로 나누어서 위 바이오필터는 bottom-up으로, 아래 바이오필터는 top-down으로 공급하고, 주기적으로 각각 top-down 및 bottom-up으로 폐가스 공급 방향을 바꾸는 개선된 바이오필터설계를 가지는 바이오필터의 압력강하 및 미생물 population 분포 등을 관찰하고, 같은 유효부피를 갖고 unidirectional flow (UF)를 갖는 전통적 바이오필터의 경우의 압력강하 및 미생물 population 분포 등과 비교하였다.

2. 재료 및 방법

2-1. 실험장치 및 구성

2-1-1. 전통적 바이오필터와 개선된 바이오필터시스템의 구성

전통적인 4단의 바이오필터($\phi=5$ cm; 유효높이 80 cm)와 비교했을 때에 압력강하가 적고 제거효율이 유지되기 위하여 Fig. 1(a)-(b)와 같은 2단의 바이오필터 2개로 구성된 개선된 바이오필터시스템($\phi=5$ cm; 유효높이 40 cm \times 2)을 구축하였다. 바이오필터 각 단의 길이는 25 cm이고 각 단의 충전된 미생물담체의 높이는 20 cm이다.

2-1-2. 폐가스 공급장치의 구성

블러워(Young Nam Yasunnaga, 토출압력; 0.12 kg_f/cm², 최대유량; 43 L/min)로 공기를 공급하여서 에탄올을 공급장치에 공급된 공기가 heating band에 의하여 약 140 °C 정도로 가열된 관을 통과할 때에 에탄올을 syringe pump(KD Scientific, Model: KDS200)를 이용하여 조절된 양을 이 관에 주입하여 에탄올이 함유된 공기를 mixing chamber에 공급하였다. 또한 0.2% Na₂S 용액을 peristaltic pump (Masterflex)를 이용하여 염산에 공급하여 황화수소를 발생시키고 이러한 황화수소 발생장치에 공기를 공급하여 발생한 황화수소 가스를 lead acetate 용액을 통과시킨 후에 mixing chamber에 공급하였다. 그리고 mixing chamber에서 에탄올과 황화수소가 함유된 공기들을 혼합하였다. 블러워에서 공기를 이송하는 관은 tygon 관을 사용하였고 mixing chamber에서 에탄올과 황화수소가 동시 함유된 공기를 개선된 바이오필터시스템 및 전통적 바이오필터로 각각 top-down과 bottom-up 및 top-down으로 공급하기 위하여 내산성이 있는 viton관을 사용하여 배관하였다. 에탄올 및 황화수소 공급 장치를 포함한 개선된 바이오필터시스템과 전통적 바이오필터의 구성은 각각 Figs. 2와 같다.

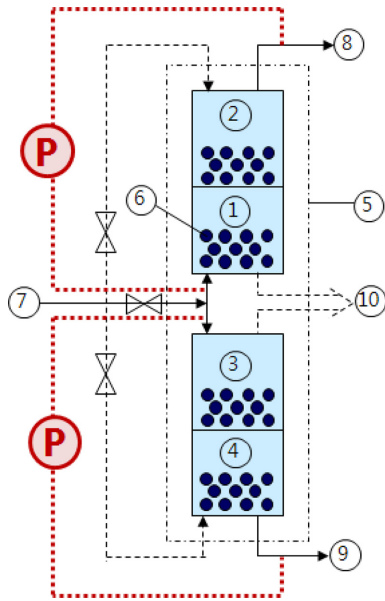


Fig. 1. (a) Biofilter system with improved design (R reactor).

1. R_{up1} (lower column of upper biofilter)
 2. R_{up2} (upper column of upper biofilter)
 3. R_{dn3} (upper column of lower biofilter)
 4. R_{dn4} (lower column of lower biofilter)
 5. Biofilter system with improved design
 6. Microbes-carrying-media
 7. Waste air fed to a biofilter
 8. Treated waste air fed bottom-up
 9. Treated waste air fed top-down
 10. Treated waste air after feeding direction being reversed
- *Ⓟ denotes a pressure gauge

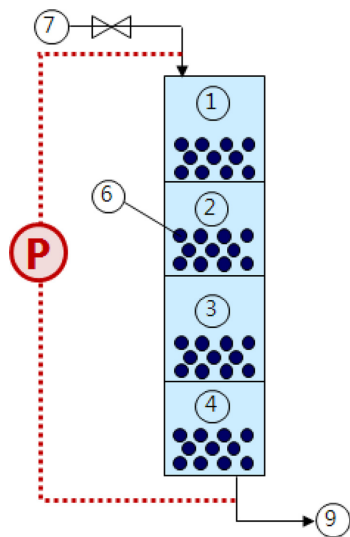


Fig. 1. (Continued) (b) Conventional biofilter (L reactor).

1. L_1 (1st column of a biofilter)
 2. L_2 (2nd column of a biofilter)
 3. L_3 (3rd column of a biofilter)
 4. L_4 (4th column of a biofilter)
 6. Microbes-carrying-media
 7. Waste air fed to a biofilter
 9. Treated waste air fed top-down
- *Ⓟ denotes a pressure gauge.

2-2. 미생물 및 미생물담체

2-2-1. 미생물진소시염구축 및 미생물담체 선정

미생물담체는 활성탄, compost 및 페타이어담체를 1 대 1 동부피로 혼합하여 사용하였고, 미생물담체에 접종할 미생물은 황화수소 분

해균주 *Enterobacter* sp. 1153 및 *Burkholderia cepacia* G4의 consortium 으로 하였다.

2-2-2 미생물 배양 및 접종

Burkholderia cepacia G4를 바이오필터의 담체에 접종하기 위하여 다음과 같이 배양하였다. 아래의 Table 1과 같은 조성의 medium을 조제하고 salt stock solution (100 ml), $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (10 ml), $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (10 ml) 및 sterilized distilled water (880 ml)를 혼합하여 1 L로 만든 후에 페놀 22 μl (5 mM)를 첨가하여 medium을 조제하였다. 고체배지에 *Burkholderia cepacia* G4를 도말하여 생성된 콜로니를 백금으로 긁어서 조제한 medium에 접종하여 shaking incubator에서 30°C, 200 rpm의 조건으로 진탕 배양하였다. 이때에 optical density를 spectrometer를 사용하여 600 nm의 파장에서 3시간마다 측정하여 흡광도가 0.8 이상일 때에 바이오필터의 담체에 접종하였다. 한편 *Enterobacter* sp. 1153을 바이오필터의 담체에 접종하기 위하여 다음과 같이 배양하였다. Table 2와 같은 조성의 medium을 조제한 후에 고체배지에 *Enterobacter* sp. 1153을 도말하여 생성된 콜로니를 백금으로 긁어서 조제한 medium에 접종하여 shaking incubator에서 30°C, 200 rpm의 조건으로 진탕 배양하였다. 이때에 optical density를 spectrometer를 사용하여 660 nm의 파장에서 3시간마다 측정하여 흡광도가 0.8 이상일 때에 바이오필터의 담체에 접종하였다. 바이오필터 담체에 미생물접종은 진탕배양된 *Burkholderia cepacia* G4와 *Enterobacter* sp. 1153을 혼합하여 48시간 동안 0.4 ml/min의 유량으로 혼합 medium을 바이오필터로 재순환시켜서 수행되었다.

2-2-3. 미생물담체에 고정된 미생물 관찰(SEM) 및 미생물담체 함유율과 pH 측정

미생물담체에 고정하는 미생물 혼합물의 분포특성을 확인하기 위하여 바이오필터 실험이 끝난 후에 적용된 활성탄과 compost의 표면 및 페타이어담체 내부 및 표면에 부착된 미생물에 대한 SEM image (Field Emission Scanning Electron Microscope. Hitachi, S-4300)를 관찰하였다. 한편 바이오필터담체의 moisture 양의 측정은, 바이오필터담체를 ambient 조건 또는 담체 50 ml를 증류수로 젖게 하고 밀폐한 100 ml 비이커에 10일간 유지하였다가, 바이오필터담체 20 g을 채취하여 비이커에 담고 dry oven (Sam Heung vacuum dry oven) 안에서 24시간 동안 105°C에서 건조시킨 후 무게를 재어, 건조 전의 담체 무게와 건조 후의 담체 무게 차를 건조 전의 무게로 나누어서 함유율을 측정하였다. 미생물담체의 pH는 각각의 sampling port에서 샘플을 20 g 씩 채취해서 비이커에 담고 3차 증류수 50 ml로 교반 후 상등액 부분을 pH meter (Istek 720P)로 측정하였다.

2-2-4. 미생물담체 공극율 및 비표면적

바이오필터담체로서 (주)삼천리탄소에서 구입한 입상 활성탄 (BET 비표면적, 1,100 m^2/g ; micro-pore 용적, 0.4~0.6 cc/g; 평균세 공반경, 13~20Å), compost 및 (주)삼광수기에서 구입한, 입도평균 (median)이 25 mesh인 페타이어 분말과 EVA (ethyl vinyl acetate)의 혼합물을 압출하고 코코넛유래 활성탄 분말(150 mesh, BET 비표면적 1,107 m^2/m^3)을 도포한 페타이어담체(유효지름 5 mm, 비표면적 1,500 m^2/m^3)로 구성된 동부피의 혼합물을 사용하였다. 따라서 바이오필터담체의 겉보기밀도는 1) 평균지름이 2.5 mm인 메스 실린더 50 ml 부피의 입상 활성탄 2) 평균지름이 0.6 mm인 메스실

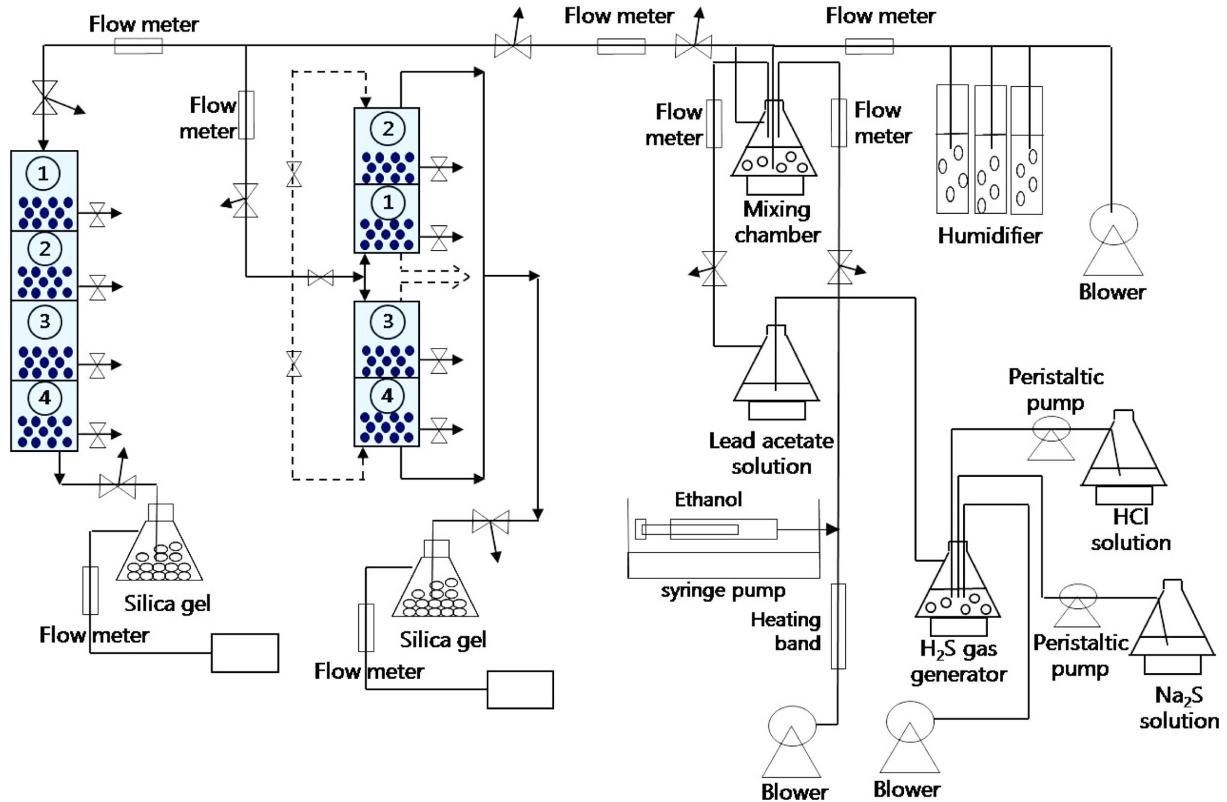


Fig. 2. Schematic diagram of a biofilter system with improved design (R reactor) and a conventional biofilter (L reactor) treating waste-air containing malodor and VOC.

Table 1. Compositions of buffer and mineral solution

Salt stock solution		Mineral solution	
NaHPO ₄	70 g/L	CaCl ₂ ·2H ₂ O	1.5 g/L
KH ₂ PO ₄	30 g/L	MgSO ₄ ·7H ₂ O	24.6 g/L
NaCl	50 g/L		
NH ₄ Cl	10 g/L		

Table 2. Compositions of culture medium

Na ₂ S ₂ O ₂ ·5H ₂ O	8.0 g/L
Yeast extract	2.0 g/L
KH ₂ PO ₄	1.0 g/L
K ₂ HPO ₄	1.0 g/L
MgCl ₂	0.2 g/L
FeSO ₄ ·7H ₂ O	0.01 g/L
NH ₄ Cl	1.5 g/L

린더 50 ml 부피의 compost 및 3) 평균지름이 5 mm인 메스실린더 50 ml 부피의 페타이어담체의 무게를 제어 입상 활성탄, compost 및 페타이어담체의 겉보기밀도를 각각 측정하였다. 한편 젖은 바이오필터담체(입상 활성탄 및 compost) 각각의 50 ml를 각각 용기에 담고 물을 채웠을 때와 안 채웠을 때에 무게차이를 3회 측정하여, 그 평균값으로서 공극율(ϵ , wet porosity)을 산출하였다. 한편 페타이어담체의 총공극율은 1 L 페타이어 담체의 총 공극을 물로 채웠을 때의 총 질량에서 담체 내부공극이 비었을 때의 겉보기밀도를 빼서 구하였고, 페타이어담체의 외부공극율은 1 L 페타이어 담체의 총 공극을 물로 채웠을 때의 총 질량에서 담체 내부공극이 물로 채

워졌을 때의 겉보기밀도를 빼서 구하였다. 또한 페타이어담체의 내부공극율은 총공극율에서 외부공극율을 빼서 구하였다. 바이오필터담체 각각의 비표면적은 Eqs. (1)과 (2)의 방법으로 산출하였다.

단위부피당 표면적, 즉 비표면적(specific surface area)은

$$a = \frac{A}{V} = \frac{6(1-\epsilon)}{\Phi_s D_p} \quad (1)$$

이고

미생물담체 혼합물의 비표면적은

$$\bar{a} = \sum_{i=1}^n a_i x_i = \sum_{i=1}^n \frac{6(1-\epsilon)}{\Phi_{s_i} D_{p_i}} x_i \quad (2)$$

을 이용하여 산출한다.

where D_{p_i} = 평균입자 지름

x_i = 부피분율

Φ_{s_i} = 구형도

을 이용하여 산출하였다.

2-3. 바이오필터의 개선된 설계조건에 따른 압력강하 및 미생물 population 분포

2-3-1. 바이오필터의 개선된 설계조건에 따른 압력강하 및 미생물 population 분포 확립

Fig. 1(a)-(b)와 Fig. 2와 같은 개선된 설계조건의 바이오필터[이하 R반응기]와 같은 유효 부피의 전통적 바이오필터[이하 L반응기]를 Table 3의 실험조건으로 30 °C에서 100일 동안 운전하여 압력강하 및 미생물 population 분포를 구축하고 상호 비교 및 평가하였다. 바

Table 3. Operating condition of biofilter system with improved design and conventional biofilter

Stage	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Q (L/min)	0.5	1	1	2	2	2	2	2
C _{go} (H ₂ S)	30	30	60	60	100	250	500	500
C _{go} (Ethanol)	800	800	1300	1300	2000	2000	2000	2000
Duration (day)	20	10	20	10	10	10	10	10

1. The direction of waste air-supply to a biofilter system with improved design has been reversed at the 8th stage of each improved biofilter (R-reactor) run (The directions of bottom-up and top-down were reversed to those of top-down and bottom-up, respectively).
2. Buffer solution-injection schedule: each of 10 mL was injected to each improved biofilter (R-reactor) per day during I-VI runs while 20 mL was injected to a conventional biofilter (L-reactor) per day during I-VI runs; each of 15 mL was injected to each improved biofilter (R-reactor) per day during VII-VIII runs while 30 mL was injected to a conventional biofilter (L-reactor) per day during VII-VIII runs (In this study there was no observed effluent of buffer solution out of the bottom of biofilter systems).
3. Both C_{go} and Q denote feed concentration (ppmv) and air flow rate, respectively.

Table 4. Components of Plate Count Agar (PCA) (105463 Plate count agar, MERCK, Germany)

Plate Count Agar (22.5 g/L)	
Yeast extract	2.5 g/L
Peptone	5.0 g/L
Glucose	1.0 g/L
Agar	14.0 g/L

이오필터 운전 1~7단계에서 Fig. 1(a) 및 Fig. 2와 같이 R반응기 중에서 상부의 2단으로 구성된 바이오필터(R_{up})는 처리할 폐가스를 bottom-up으로 공급받고, 하부의 2단으로 구성된 바이오필터(R_{dn})는 top-down으로 공급받았다. 운전 8단계에서는 처리할 폐가스의 공급방향을 거꾸로 전환하였다. 한편 L반응기는 Fig. 1(b) 및 Fig. 2와 같이 모든 운전단계에서 처리할 폐가스를 top-down으로 공급받아 처리하였다.

2-3-2. 미생물 population 분포에 대한 영향 평가

바이오필터의 개선된 설계 및 운전조건에 따른 바이오필터에 고정된 미생물 population 분포에 대한 영향을 바이오필터 각단에서 미생물담체 sample을 채취하여 고체배지에 접종한 후에 일정시간 후에 생성된 콜로니 개체 수(CFU counts)를 분석하여 미생물 population 및 분포에 대한 영향을 평가하였다.

2-3-2-1. 고체 배지 제조

증류수 1L에 Table 4와 같은 조성의 PCA 22.5g을 넣고 충분히 교반시켜 녹인 후 배지로 사용하였고, autoclave (121 °C, 15 min)에 멸균시켜 clean bench 안에서 petri-dish에 각각 부어서 고체배지를 제조하였다.

2-3-2-2. 도말

L반응기(4단)와 R반응기(2단×2)의 각 단에서 바이오필터의 미생물담체 중 페타이어담체와 활성탄형태로 구분하여 각각 1g을 취하여, 10배 희석법에 따라 10, 10², 10³, 10⁴ 및 10⁵배로 희석하였다. 희석한 용액을 고체배지에 100 μl 떨어뜨려 도말하였으며, clean bench 안에서 작업을 하였다.

2-3-2-3. 배양 및 관찰계수

각각의 petri-dish를 incubator (30 °C)에 넣고 정치배양을 하였고, 12시간 후 배양된 콜로니수를 관찰 계수하였다.

3. 결과 및 토론

3-1. 미생물담체에 고정된 미생물 및 미생물담체 함수율과 pH 전통적 바이오필터의 각 미생물담체(입상활성탄, compost 및 페

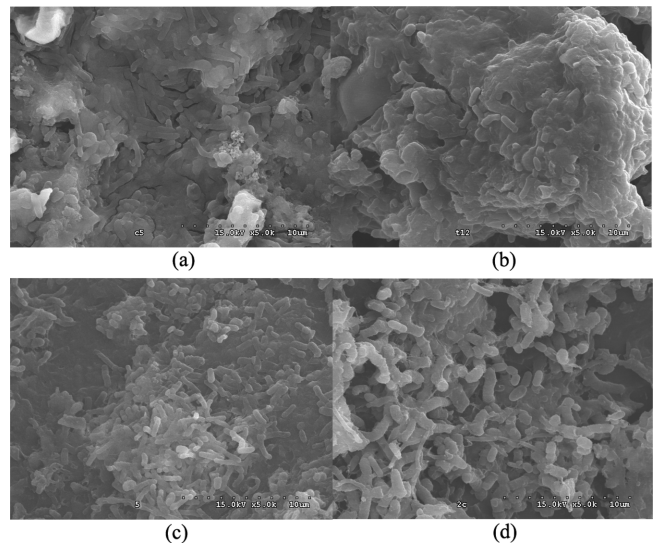


Fig. 3. SEM image of the surface of microbes-carrying media: (a) GAC, (b) compost, (c) waste-tire crumb, (d) cross-section of waste-tire-crumb.

타이어담체) 함수율의 4개의 단에 대한 평균값은 각각 45, 62 및 54%이었다. 또한 개선된 바이오필터시스템의 미생물담체(활성탄+compost+페타이어담체)의 pH 값은 top-down 방식으로 폐가스가 공급될 때에 바이오필터 위단과 아랫단이 각각 4.62 및 6.25로 단수가 증가할수록 증가하였다. 한편 각 미생물담체(입상활성탄, compost 및 페타이어담체)에 고정된 미생물에 대한 SEM 분석결과와 Figs. 3(a)-(d)와 같다.

3-2. 미생물담체 공극율 및 비표면적

입상 활성탄 및 compost의 공극률(ε, wet porosity)은 Table 5와 같이 각각 0.553 및 0.702의 값이 산출되었다. 한편 페타이어담체의

Table 5. Characteristics of the media packed in the biofilter

	GAC	Compost	Waste tire crumb
Apparent density (g/cc)	0.41	0.37	0.27
Wet porosity	0.553	0.702	^a 0.74/0.6
Equivalent diameter (mm)	2.5	0.6	5
Interfacial area per unit volume (m ² /m ³)	1292.6	2980	^b 1500

^aWet porosity values of 0.74 and 0.6 correspond to those of total porosity and exterior porosity, respectively.

^bData of Sam-Kwang company.

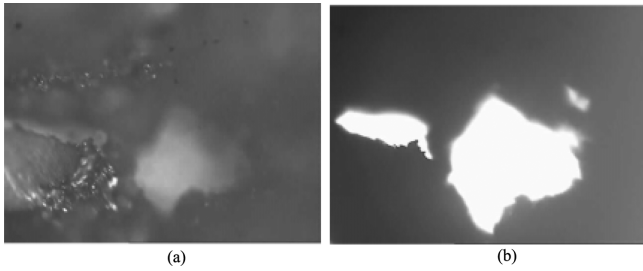


Fig. 4. Inner pore of the media of waste tire crumb [reflected light observation (the left) and transmitted light observation (the right)] by light microscopy ($\times 60$).

총공극율, 외부공극율 및 내부공극율은 각각 0.74, 0.6 및 0.14이었다. 입상 활성탄 및 compost의 구형도(Φ)를 각각 round sand와 같은 0.83 및 1로 간주하였다. 따라서 유효지름이 2.5 mm인 입상 활성탄의 경우 비표면적이 $1,292.6 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 을 얻었고 유효지름이 0.6 mm인 compost의 경우는 비표면적이 $2,980 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 을 얻었다. 이와 같이 바이오필터의 미생물담체로 사용된 입상활성탄, compost 및 페타이어담체의 물성은 Table 5와 같다. 한편 페타이어담체의 내부공극을 Fig. 4와 같이 관찰하였다.

3-2. 압력강하 결과

3-2-1. 압력강하 측정결과

Fig. 1(a)-(b)와 Fig. 2와 같은 개선된 설계조건의 R반응기와 같은 유효 부피의 전통적 L반응기를 Table 3의 운전조건으로 30 °C에서 100일 동안 운전하여 관찰한 압력강하 결과는 Fig. 5와 같다. 본 연구에서 제시한 개선된 바이오필터시스템으로서, 상부 및 하부로 분리되고 폐가스 공급유량이 각각 bottom-up 및 top-down 방식으로 반반씩 분리되어 공급되는 R반응기들 중에서 운전 1~7단계에서 유체흐름이 bottom-up인 R_{up} 반응기는 압력강하실험값이 0.3 mm H₂O/m를 유지하다가 유량이 커짐에 따라서 0.6 mm H₂O/m 정도

로 증가하고, 8단계에서 유체흐름이 top-down으로 변경되어서 1.2 mm H₂O/m 정도로 더욱 증가함이 관찰되었다. 반대로 운전 1~7단계에서 유체흐름이 top-down인 R_{dn} 반응기는 압력강하실험값이 0.6 mm H₂O/m를 유지하다가 유량이 커짐에 따라서 1.2 mm H₂O/m 정도로 증가하고, 8단계에서 유체흐름이 bottom-up으로 변경되어서 0.6 mm H₂O/m 정도로 감소함이 관찰되었다. 따라서 R반응기 중에서 유체흐름이 bottom-up 방식이 top-down 방식보다 압력강하가 적었다. 한편 전통적 바이오필터로서 처리할 폐가스가 한꺼번에 top-down 방식으로 공급되는 L반응기에서는 압력강하실험값이 초기(운전 1~2단계)에 1 mm H₂O/m를 유지하다가 유량이 커지는 운전 4 단계까지 계속 증가하여 약 13 mm H₂O/m에 도달하였다. Thalasso *et al.*[17]이 제시한 “압력강하가 미생물의 과도한 성장에 의한 바이오필터의 void 부분의 폐색으로 야기되기 때문에, 압력강하가 정해진 값보다 커질 경우에 수분공급을 금하고 영양분을 제한하는 건조 기간을 설정하고 압력강하가 작아지면 수분공급을 재개하는 바이오필터 운전방법”에 따라서 2일 동안 buffer solution 공급을 중단하였다. 그에 따라서 압력강하 값이 적어져서 압력강하실험값이 2.9 mm H₂O/m로 유지됨이 관찰되었다. 그러나 L반응기 운전 초기 값인 1 mm H₂O/m 보다는 약 3배의 압력강하 값으로 증가하였다. 한편 스킨리아(scoria) 담체 등을 충전한 전통적인 바이오필터를 운전하여 VOC를 처리하였을 때에 4.2 mm H₂O/m 평균 압력강하 값이 보고되었다[19,20]. 따라서 본 연구에서 제시한 개선된 바이오필터(R반응기)의 압력강하 실험값은 같은 조건의 전통적인 바이오필터(L반응기)의 압력강하 실험값에 대한 비가 운전 초기에는 약 30~60%이었고 정상상태의 장기 운전에서는 약 20~40% 이하로 관찰되었고 그에 따라서 개선된 바이오필터(R반응기)는 전통적인 바이오필터(L반응기) 압력강하의 약 40~80% 이상을 감소시켰다.

3-2-2. 바이오필터 압력강하 값 및 바이오필터 압력강하 모델

고정담체 충전탑(packed bed)의 압력강하를 예측하는 Ergun 식은 다음과 같다.

$$\frac{\Delta P}{H} = \frac{150\mu(1-\epsilon)^2 u_0}{\epsilon^3 d_p^2} + \frac{1.75(1-\epsilon)\rho u_0^2}{\epsilon^3 d_p} \quad (3)$$

따라서 바이오필터 공극율(ϵ)을 식 (3)에 대입하여 바이오필터 베드의 단위높이당 압력강하 값을 구할 수 있다. 바이오필터의 운전에서 퇴비(compost)를 미생물담체로 쓰는 바이오필터 경우에 총 압력강하 값을 500 Pa (i.e., 50 mm H₂O) 미만으로 유지하고; 토양 바이오필터의 경우는 압력강하 값을 1,500 Pa (i.e., 150 mm H₂O) 미만으로 유지하고 있다. 전형적인 바이오필터 배기팬을 선정하기 위하여 고려해야할 것은 1) 바이오필터가 설치된 빌딩을 통한 압력강하는 0.1~0.12 inch H₂O이고, 2) 바이오필터를 통한 압력강하는 0.1~1.0 inch H₂O이다. 따라서 바이오필터 배기팬을 선정할 때에는, 건물과 바이오필터의 양쪽 압력강하의 합을 고려하여야한다. 또한 바이오필터 담체의 과도한 수분함량은 담체사이의 공극을 물이 대체하여 편류가 발생하므로 운전하는 바이오필터 압력강하 값의 증가를 유발한다. 바이오필터($\phi=5 \text{ cm}$) 실험에서 유량(Q)이 2 L/min의 운전 조건으로 Re 값($d_p=2.5 \text{ mm}$ 기준)은 2.785이었다. 바이오필터에 충전된 구형의 미생물담체간의 접촉점이 6개 존재한다고 가정하였을 때에 공극율(ϵ)은 미생물담체 지름(d_p)과 무관하게 0.4764이고, 이 값을 적용했을 때의 Eq. (3)의 Ergun 식을 사용한 압력강하는 L반응기의

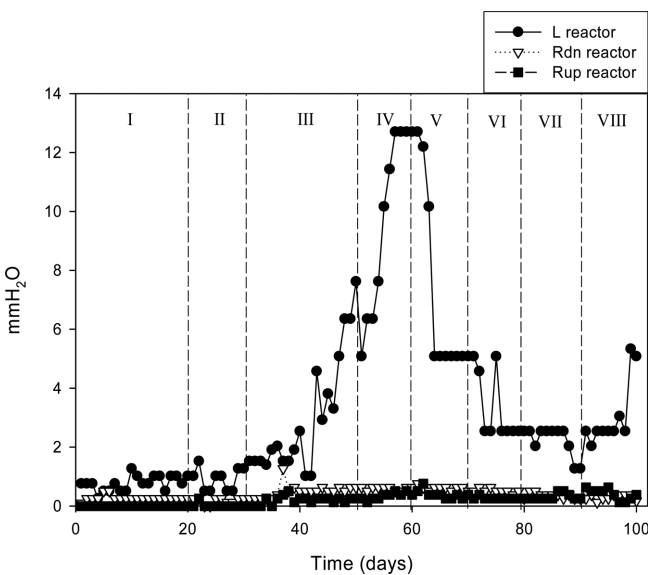


Fig. 5. Transient behavior of pressure drop of a conventional biofilter (L reactor) and biofilter system with improved design (R reactor).

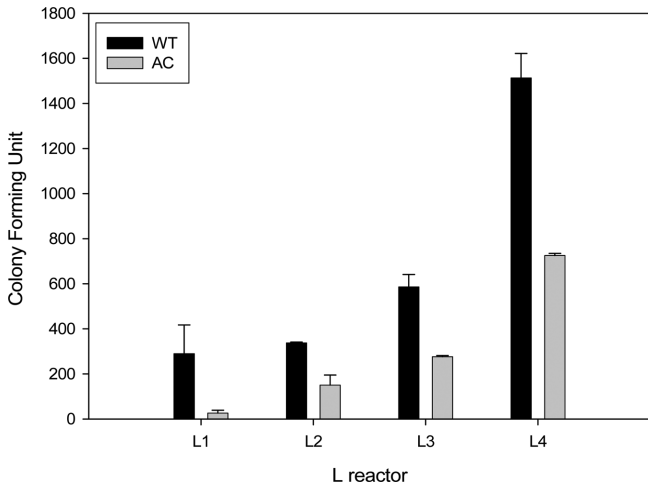


Fig. 6. Microbial counts with dilution factor of 10^4 at each column of conventional biofilter (L reactor) (top→down): L1, top column of biofilter; L2, second column of biofilter from the top; L3, third column of biofilter from the top; L4, bottom column of biofilter [WT: Waste-tire crumb packing as microbes-carrier; AC: Granular activated carbon]*Arrow denotes the direction of feed gas to a biofilter during the operation.

압력강하값인 2.9 mm H₂O/m과 근접한 값인 2.5 mm H₂O/m로 산출되었다.

3-3. 미생물 population 및 분포평가

바이오필터의 개선된 설계 및 운전조건에 따른, 바이오필터에 고정된 미생물 population 및 분포에 대한 영향을, 바이오필터 각단에서 미생물담체 sample을 채취하여 고체매지에 접종한 후에 일정시간 후에 생성된 콜로니 개체 수를 분석하여 미생물 population 및 분포에 대한 영향을 평가하였다. 황화수소와 에탄올을 함유한 악취가스가 top→down으로 공급되는 4단으로 구성된 L반응기에서의 미생물 population 분포는 Fig. 6과 같이 나타났다. 미생물 population 분포는 페타이어담체와 입상 활성탄의 두 경우 모두 바이오필터 top 단(L1)에서 가장 낮았고 바이오필터 밑으로 내려갈수록 미생물 population이 커졌다. 따라서 바이오필터의 bottom 단에서 미생물 population이 가장 크게 나타났다. 이 현상은 다음과 같이 해석되어진다. 바이오필터에 주기적으로 공급되는 물을 포함한 영양액은 중력에 의하여 바이오필터의 아랫방향으로 이동하여 머물러 있다가 미생물에 의하여 소모되거나 증발되었다(본 연구에서 바이오필터 하부로 배출된 배출수는 관찰되지 않았음). 또한 바이오필터 처리할 폐가스가 바이오필터의 top→down 방향으로 공급되므로 바이오필터의 top 단의 미생물담체는 밑의 단의 미생물담체보다 수분을 더 많이 빼앗겨서 건조해지기 쉽다. 따라서 바이오필터의 아래 단으로 갈수록, 미생물 population 성장에 적합한 담체 환경이 되므로 미생물 population이 증가하는 분포를 보인다고 사료된다. 바이오필터의 같은 단 높이에서 페타이어담체는 입상활성탄 담체보다 월등히 큰 미생물 population을 나타내는 미생물 콜로니 개체수(CFU counts)를 보였다. 이것은 미생물 성장에 있어서 페타이어담체가 입상활성탄 담체보다 미생물에 대하여 더욱 적합한 생육환경을 제공한다는 것을 보여준다.

황화수소와 에탄올을 함유한 악취가스가 운전 1~7단계에서 top→down(R_{dn3}→R_{dn4}) 또는 bottom→up(R_{up1}→R_{up2})으로 공급되는

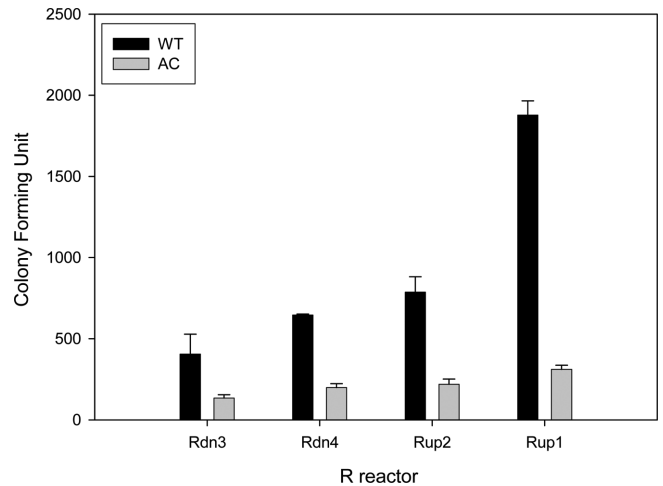


Fig. 7. Microbial counts with dilution factor of 10^4 at each column of improved biofilters (R reactor): R_{dn3}, top column of a lower biofilter (top→down); R_{dn4}, bottom column of a lower biofilter (top→down); R_{up2}, top column of an upper biofilter (bottom→up); R_{up1}, bottom column of an upper biofilter (bottom→up)[WT: Waste-tire crumb packing as microbes-carrier; AC: Granular activated carbon]*Arrow denotes the direction of feed gas to a biofilter during the operation of stage I-VII.

R반응기(2단 바이오필터×2)에서의 미생물 population 분포를 Fig. 7과 같이 나타내었다. 악취가스가 공급되는 방향에 상관없이 미생물 population 분포는 전통 바이오필터인 L반응기의 경우와 마찬가지로 페타이어담체와 입상 활성탄의 두 경우 모두 바이오필터 상단에서 더 낮았고 바이오필터 하단에서 미생물 population이 더 커졌다. 이 현상에 대하여 악취가스가 top→down으로 공급되는 경우는 L반응기의 경우에서 전술하였고, 악취가스가 bottom→up으로 공급되는 경우는 다음과 같이 해석되어진다. 바이오필터에 주기적으로 공급되는 물을 포함한 영양액은 중력에 의하여 바이오필터의 아랫방향으로 이동하여 머물러 있다가 미생물에 의하여 소모되거나 증발되었다(본 연구에서 바이오필터 하부로 배출된 배출수는 관찰되지 않았음). 그러나 바이오필터 처리할 폐가스가 바이오필터의 bottom→up 방향으로 공급되므로 바이오필터의 상단의 미생물담체는 악취가스가 top→down으로 공급되는 경우보다 수분을 덜 빼앗겨서 쉽게 건조해지지 않는다. 또한 미생물 생육환경이 더 좋은 바이오필터 하단으로 황화수소와 에탄올을 함유한 악취가스가 공급되므로 바이오필터 하단에서 microbial population 성장이 극대화될 수 있다. 그 결과 R반응기에서 악취가스가 bottom→up (R_{up1}→R_{up2})으로 공급되는 경우에 악취가스가 top→down (R_{dn3}→R_{dn4})으로 공급되는 경우보다 미생물 population 성장이 더욱 컸으며, Fig. 7과 같이 입상활성탄 담체보다 페타이어담체에서 이 현상이 더욱 두드러졌다. 각 바이오필터의 미생물 population 분포도를 각 바이오필터의 최하단의 콜로니 개체 수(colony forming unit (CFU)) 값을 최상단 값으로 나눈 값을 사용하여 Table 6과 같이 나타내었다. 전통적 바이오필터인 L반응기와 개선된 바이오필터시스템인 R반응기 각각의 미생물 population 분포도를 Table 6에서와 같이 비교하였을 때에, R반응기의 미생물 population은 L반응기보다 입상 활성탄 담체와 페타이어담체의 경우에 각각 약 15배 및 2.5배 만큼 더 크게 분포되었다.

Table 6. Microbial population distribution of conventional (L-reactor) and improved biofilter (R-reactor)

Microbes-carrying media	L-reactor	R-reactor	
	$L_4/L_{1(top \rightarrow down)}$	$R_{dn4}/R_{dn3(top \rightarrow down)}$	$R_{up1}/R_{up2(bottom \rightarrow up)}$
AC ²	24	1.6	1.3
WT ³	5	1.7	2.5

¹The direction of waste air-supply to biofilter has been reversed at the 8th stage of each improved biofilter(R-reactor) operations.

²Granular activated carbon(GAC)-media.

³Waste tire crumb-media.

4. 결 론

동량의 퇴비, 입상활성탄 및 페타이어담체를 미생물담체로 바이오필터에 충전한 바이오필터 압력강하실험에서 R반응기에서는 압력강하실험값이 0.3~1.2 mm H₂O/m로 관찰되었다. 한편 L반응기에서는 압력강하실험값이 1 mm H₂O/m에서 13 mm H₂O/m까지 증가하였다가 2.9 mm H₂O/m로 감소함이 관찰되었다. 따라서 R반응기는 운전 초기 또는 정상상태의 장기운전에서 L반응기 압력강하의 약 40~80% 이상을 감소시켰다. 황화수소와 에탄올을 함유한 악취가스가 top→down으로 공급되는 4단으로 구성된 L반응기에서의 미생물 population 분포는 페타이어담체와 입상 활성탄의 두 경우 모두 L1에서 가장 낮았고 바이오필터 밑으로 내려갈수록 미생물 population이 커졌다. 따라서 바이오필터의 bottom 단에서 미생물 population이 가장 크게 나타났다. 또한 바이오필터의 같은 유효높이에서 페타이어담체는 입상활성탄 담체보다 월등히 큰 미생물 population을 나타내는 미생물 콜로니 개체수(CFU counts)를 보였다. 이것은 미생물 성장에 있어서 페타이어담체가 입상활성탄 담체보다 미생물에 대하여 더욱 적합한 생육환경을 제공한다는 것을 보여준다. R반응기에서의 미생물 population 분포는 L반응기의 경우와 마찬가지로 페타이어담체와 입상 활성탄의 두 경우 모두 바이오필터 상단에서 더 낮았고 바이오필터 하단에서 미생물 population이 더 커졌다. R반응기에서 악취가스가 bottom→up ($R_{up1} \rightarrow R_{up2}$)으로 공급되는 경우에 악취가스가 top→down ($R_{dn3} \rightarrow R_{dn4}$)으로 공급되는 경우보다 미생물 population 성장이 더욱 컸으며, 입상활성탄 담체보다 페타이어담체에서 이 현상이 더욱 두드러졌다. L반응기와 R반응기 각각의 미생물 population 분포도를 비교하였을 때에, R반응기의 미생물 population은 L반응기보다 입상 활성탄 담체와 페타이어담체의 경우에 각각 약 15배 및 2.5배 만큼 더 고르게 분포되었다. 이러한 R반응기의 고른 미생물 population 분포도는 미생물이 주로 미생물담체의 내부공극에 존재하는 페타이어담체보다 미생물이 주로 담체 외부표면에 부착되어 성장하는 입상 활성탄 담체 경우에 훨씬 더 효과적으로 작용하는 것으로 관찰되었다. 따라서 페타이어담체가 미생물 population 분포의 고른 정도의 견지에서 입상활성탄보다 바이오필터 type에 덜 민감하였음이 또한 관찰되었다.

감 사

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성 사업으로 수행된 연구결과입니다.

참고문헌

1. Yang, C. P., Suidan, M. T., Zu, X. Q. and Kim, B. J., "Biomass Accumulation Patterns for Removing Volatile Organic Compounds in Rotating Drum Biofilters," *Water Sci. Tech.*, **48**, 89-96 (2003).
2. Alonso, C., Suidan, M. T., Kim, B. R. and Kim, B. J., "Dynamic Mathematical Model for the Biodegradation of VOCs in a Biofilter: Biomass Accumulation Study," *Environ. Sci. Technol.*, **2**, 3118-3123(1998).
3. Okkerse, W. J. H., Ottengraf, S. P. P., Osinga-Kuipers, B. and Okkerse, M., "Biomass Accumulation and Clogging in Biotrickling Filters for Waste Gas Treatment," *Biotechnol. Bioeng.*, **63**, 418-430(1999).
4. Smith, F. L., Sorial, G. A., Suidan, M. T., Breen, A. W. and Bismas, 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).
5. Cox, H. H. J. and Deshusses, M. A., "Biomass Control in Waste Air Biotrickling Filters by Protozoan Predation," *J. Eng. Appl. Sci.*, **62**, 216-224(1999).
6. Cox, H. H. J. and Deshusses, M. A., "Chemical Removal of Biomass from Waste Air Biotrickling Filters: Screening Chemicals of Potential Interest," *Water Res.*, **33**, 2383-2391(1999).
7. Moe, W. M. and Irvine, R. L., "Polyurethane Sponge Medium for Biofiltration, II: Operation and Performance," *J. Environ. Eng.*, **126**, 826-832(2000).
8. Kenes, C. and Veiga, M. C., "Inert Filter Media for the Biofiltration of Waste Gas-characteristics and Biomass Control," *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.*, **1**, 201-214(2002).
9. Yang, C. P., Suidan, M. T., Zu, X. Q. and Kim, B. J., "Comparison of Single-layer and Multi-layer Rotating Drum Biofilters for VOC Removal," *Environ. Prog.*, **22**, 87-94(2003).
10. Dorado, A. D., Baeza, J. A., Lafuente, J., Gabriel, D. and Gamisans, X., "Biomass Accumulation in Biofilter Treating Toluene at High Loads-Part 1: Experimental Performance from Inoculation to Clogging," *Chem. Eng. J.*, in print(2012).
11. Song, J. and Kinney, A., "Effect of Vapor-phase Bioreactor Operation on Biomass Accumulation, Distribution, and Activity: Linking Biofilm Properties to Bioreactor Performance," *Biotechnol. Bioeng.*, **68**, 508-516(2000).
12. Wright, W. F., "Transient Response of Vapor Phase Biofilters," *Chem. Eng. J.*, **113**, 161-173(2005).
13. Znad, H. T., Katoh, K. and Kawase, Y., "High Loading Toluene Treatment in a Compost Based Biofilter Using Up-flow and Down-flow Swing Operation," *J. Hazard. Mater.*, **141**, 745-752(2007).
14. Xi, J., Hu, H. Y. and Qian, Y., "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**, 165-172(2006).
15. Mendoza, J. A., Prado, O. J., Veiga, C. and Kennes, C., "Hydrodynamic Behavior and Comparison of Technologies for the Removal of Excess Biomass in Gas Phase Biofilters," *Water Res.*, **38**, 404-413(2004).
16. Hassan, A. A. and Sorial, G., "Biological Treatment of Benzene in a Controlled Trickle Bed Air Biofilter," *Chemosphere*, **75**, 1315-

- 1321(2009).
17. Thalasso, F., Razo-Flores, E., Ancia, R., Naveau, H. P. and Nyns, E.-J., "Pressure-drops Control Strategy in a Fixed-bed Reactor;" *J. Hazard. Mater.*, **81**, 115-22(2001).
 18. Delhomenie, M. C., Bibeau, L., Gendron, J., Brzezinski, R. and Heitz, M., "A Study of Clogging in a Biofilter Treating Toluene Vapors;" *Chem. Eng. J.*, **94**, 211-222(2003).
 19. Lee, S. H., Lee, D. W. and Lee, M. G., "Removal Characteristics of Benzene in the Biofilter Packed with Scoria;" *Korean Chem. Eng. Res. (HWAHAK KONGHAK)*, **41**(6), 781-787(2003).
 20. Lim, K.-H., "The Treatment of Waste-air Containing Mixed Solvent Using a Biofilter: 2. Treatment of Waste-air Containing Ethanol and Toluene in a Biofilter;" *Korean J. Chem. Eng.*, **22**(2), 228-233 (2005).