

Bioscrubber Trickling Filter(BSTF)의 VOCs 제거 및 운전 특성에 관한 연구

박진도 · 서정호* · 이학성†

울산대학교 생명화학공학과, *울산과학대학 환경생활화학과

A Study on the Removal Efficiency of VOCs and Operating Characteristics by Using of Bioscrubber Trickling Filter(BSTF)

Jin Do Park · Jung Ho Suh* · Hak Sung Lee†

School of Chemical Engineering and BioEngineering, Ulsan University

*Department of Environmental & Life Chemistry, Ulsan College

(Received June 20, 2005; Accepted July 21, 2005)

ABSTRACT

Volatile organic compounds (VOCs) and odor materials are major sources of air pollution in Ulsan city, where much chemical plants are located. Therefore, it is necessary to develop a new reactor which can remove VOCs and odor materials effectively and be equipped at the end of pipe easily. A modified reactor (bioscrubber trickling filter, BSTF), which have both characteristics of biofilter and bioscrubber, was developed and tested on its reactivity with several VOCs using two types of media, fiber and activated carbon + ceramic(A/C). It was observed that the removal efficiencies of several types of VOCs such as acetaldehyde, ethylalcohol, butanol, diethylamine and triethylamine were up to 95% when they had about 100 ppm of initial concentration and 80 seconds of residence time. Good attachment of microorganisms to both media, where it is thought the reaction efficiency can be determined according to the amount of microorganisms attachment, observed with scanning electron microscopy(SEM). Initial pressure drops of the packed bed with both media were 229 mmH₂O/m at A/C column and 670 mmH₂O/m, respectively. However, maximum pressure drop of fiber column during the operation was over 1,647 mmH₂O/m. Therefore, it was thought that the fiber material would not suitable to use in the local plant as a packed bed media.

Keywords: biofilter, pressure drop, backwashing, activated carbon media

I 서 론

지속적으로 발전하는 산업과 생활의 질적 향상과 더불어 교통수단 등의 이동오염원의 운행 증가, 유기용제 및 페인트의 사용량 증가 등으로 인하여 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds: VOCs)의 배출량이 증가하고 있다. 이러한 물질들은 인체에 유해하며, 대기 중에서 광화학반응으로 오존을 생성시키는 주요 원인물질이다. 미국 EPA 정의에 의하면 VOCs는 대기 중에서 태양광선에 의해 질소산화물(NO_x)과 광화학적 산화반응으로 지표면의 오존 농도를 증가시켜 스모그

현상을 야기시키는 모든 유기화합물을 통칭하며, 메탄을 제외한 탄화수소류 중에서 레이드 증기압이 10.3 kPa (또는 1.5 psi) 이상이거나 광화학반응성, 물질사용량, 발암성 등의 유해성을 감안하여 선정된 물질이다.¹⁾

최근 많이 사용되는 VOCs 처리 기술에는 단순 소각법, RTO(Regenerated Thermal Oxidation), RCO(Regenerated Catalytic Oxidation), 생물학적 처리법 등이 있으나, 단순소각법, RTO, RCO 등은 고온의 열을 필요로 하므로 VOCs의 농도가 낮을 경우, 경제성이 낮은 결점이 있으며, biofilter는 고농도 및 다량의 VOCs를 처리하기에는 제거용량 등의 문제점이 있지만 생물학적 처리방법이므로 다른 처리법에 비해 운전비용이 저렴하고, 운전관리가 간단하며, 2차 오염이 없는 특징을 가지고 있다.²⁾

Biofilter는 미생물 담체를 충전시킨 반응기를 이용하

†Corresponding author : School of Chemical Engineering and Bioengineering, University of Ulsan
Tel: 82-52-259-2252, Fax: 82-52-259-1689
E-mail : hslee@mail.ulsan.ac.kr

여 생물학적으로 VOCs 및 악취물질을 제거하는 방법으로, 유럽과 일본에서는 주로 packed bed biofilter 방식을 이용하여 VOCs 및 악취물질을 처리하고 있다.³⁾ Biofilter내 미생물을 담지하는 충전물질의 재질은 토양 등을 이용하는 무기담체와 퇴비나 나무껍질 또는 섬유상 peat 등을 사용하는 유기담체로 크게 구분할 수 있다. 무기담체인 토양층은 흙 속에 존재하는 여러 종류의 미생물들이 악취 및 폐 가스의 유기성분에 쉽게 적응할 수 있는 장점이 있는 반면, 시스템의 전체 압력손실이 높고 filter의 단위면적당 유량부하(약 10 m³/hr/m²)가 적기 때문에 설치면적이 크지는 단점이 있다.⁴⁾ 이러한 단점을 보완하기 위해 유럽에서는 퇴비, peat, 나무껍질 등과 같은 유기담체를 이용하여 설치 면적(유량부하 100~300 m³/hr/m²)을 줄이고 장치의 무게 또한 가벼운 공정들이 다양하게 개발되었다.⁵⁾

Biofilter를 이용하여 VOCs 물질을 효율적으로 제거하기 위해서는 filter 재질의 입도 분포가 균일하여야 하며, media가 다공 구조로 되어 있어 많은 반응표면적을 제공하여야 하고, 압력손실을 낮게 유지할 수 있어야 한다. 또한 VOCs 및 악취물질의 생물학적 분해율을 높게 유지하기 위한 우점종 미생물의 생육조건 조절, media의 장기사용에 따른 물리적 압축 정도를 최소로 유지할 수 있는 강도와 미생물 대사과정에서 발생한 물질(biomass)에 의한 막힘 현상이 적어야 하며, 유지 보수관리가 용이하고, 교체 빈도가 적어야 한다.^{6,19)}

Medina 등⁷⁾은 활성탄과 compost를 혼합한 담체를 사용 시, 활성탄이 가지는 높은 흡착능에 의하여 갑작스런 충격부하에 대하여 완충능력을 갖는다고 하였으나, 최근에는 활성탄/폴리우레탄 복합담체^{8,20)} 및 제올라이트/폴리에틸렌 복합담체⁹⁾와 같이 단일 담체의 장점을 혼합하거나 폐타이어 등의 폐기물을 이용한 복합담체의 개발에 많은 관심이 모아지고 있다. 따라서 높은 흡착능을 가지는 재질을 선택하거나 장기간 사용 시, 압축에 따른 압력손실이 적은 media의 개발이 biofilter 공정의 상용화에 필요한 것으로 생각된다.

본 연구에서는 bioscrubber와 biotrickling filter의 장점을 합친 새로운 운전특성을 가진 반응기(Bioscrubber trickling filter, BSTF)를 제작하여 여러 종류의 VOCs 및 악취물질의 제거율을 고찰하였다. 또한 media의 재

질에 따른 압력손실과 담체층의 압축 등의 운전특성에 대하여 관찰하였다.

II. 실험방법

1. 실험 장치

본 연구에서는 기존의 bioscrubber(BS)와 biotrickling filter(BTF)의 장점을 합친 bioscrubber trickling filter(BSTF)를 고안하여 실험에 사용하였다(Fig. 1). BSTF는 순수한 BS공정의 미생물 공급 장치와 BTF의 생물막공법을 혼합한 반응기로, 직경 9 cm, 높이 72 cm의 원형 아크릴관으로 2개를 제작하였으며, 제작된 2개의 column에 각각 다른 media를 충전하였다.

각 column media는 Table 1에 나타낸 것과 같이 fiber, activated carbon과 ceramic(이하 A/C column이라 한다)을 부피비 50:50으로 혼합하여 충전하였다. Column 1의 fiber는 H사에 제작한 폐수처리용 media로서 섬모상이며, 상·하부의 지지체에 고정하였다. column 2는 혼합 media로서 시판되고 있는 pellet 형태의 활성탄(SZ-35, 신기화학)을 구입하여 사용하였으며, 세라믹 충전물은 saddle(1 in, 기수산업) 형태를 사용하였다.

반응기의 운전 온도는 실온(20~25°C)에서 수행하였으며, 폭기조 혼합액을 순환펌프를 이용하여 담체 상부에

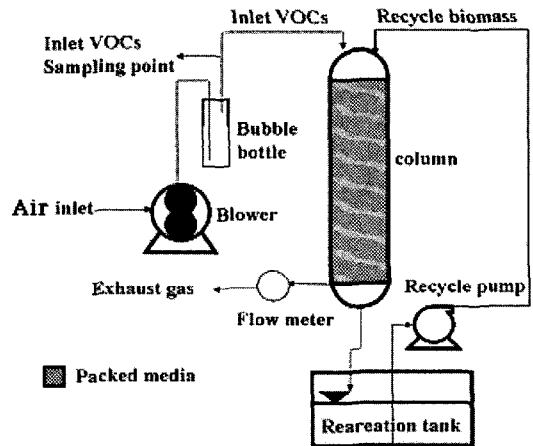


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

Table 1. Biofilter dimension

Column	Media Type	Diameter (cm)	Bed height (cm)	Bed volume (cm ³)	Bed porosity
1	Fiber	9	68	4,324	0.52
2	Activated carbon +ceramic	9	68	4,324	0.43

서 간헐적으로 뿌려 주어 미생물을 재공급하고, 하부로 흐르는 혼합액이 담체의 세척작용에 의해 channeling 현상이 감소되도록 함과 동시에 하부에서 유입된 VOCs 및 악취물질을 용해시켜 미생물에 의한 제거가 원활히 이루어지도록 하였다.

미생물 시료는 본 연구에서 사용된 VOCs 및 악취물질을 생산하는 K 산업(주)의 포기조에서 채취하여 본 실험장치의 포기조에 투입한 후 압축공기를 공급하여 충분한 용존산소가 존재하는 상태로 배양을 실시하였다. 포기조액을 간헐적으로 공급하면서 수분 조절을 하였고, 미생물 영양제는 수분 공급과 동시에 투입하였다.

실험에 사용 할 담체를 포기조에 투입한 후 영양제 및 유기물질을 유입시키면서 미생물의 부착 및 적응을 약 2주간 실시하였다. 적응이 완료된 담체를 각 column에 충전한 후 일정속도의 공기와 수분, 유기물, 영양물질(무기물 및 N, P 성분)을 유입시켜 약 1주간 새로운 환경에 미생물을 순화시켰다.

Bubble bottle을 이용하여 VOCs 및 악취물질을 일정한 농도로 column에 투입하면서 실험을 하였다.

2. 실험 및 분석

본 연구에서는 BSTF 반응기의 VOCs 및 악취물질의 제거능을 고찰하기 위하여 acetaldehyde, ethylalcohol, butanol, diethylamine, triethylamine 등을 제거대상 시료로 사용하였다. Bubble bottle을 이용하여 초기농도를 약 100 ppm으로 조절하여 column에 공급하였다(공압 체류시간: 80 sec). 분석 시료의 채취는 흡수장치를 이용하여 분석 목적물을 포집 및 농축하였으며, GC/FID(VARIAN 3800CX, VARIAN 3400CX)로 분석하였다. GC-FID의 column은 HP-1(Crosslinked Silicon Gum, 30 m×0.53 mm×0.88 μm filmness)이 사용되었고, carrier gas는 He를 사용하였으며, 유량은 85 ml/min으로 설정하였다. Detector temperature 200°C, Injector temperature 150°C로 설정하였고, Oven

temperature program은 initial temperature 40°C/3min, 6°C/min, 70°C(0 min), 20°C/min, 150°C에서 3분간 머무르도록 설정하여 분석을 하였다.

포기조의 pH를 인산염 완충용액을 이용하여 약 6.5~8.5로 유지시키면서 생존하는 미생물의 활성도를 관리하기 위하여 개체수를 관찰하였다. Biofilter의 pressure drops는 압력계(Digital Manometer, Model: Type 2654, YOKOGAW)를 이용하여 실험 기간동안 매일 측정하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 혼합시료의 제거효율 비교 실험

본 실험을 수행하기 전에 4종류의 media(fiber, 활성탄, 세라믹, 활성탄과 세라믹 혼합물)를 사용하여 특정 VOCs에 대한 제거율을 비교 실험한 결과, 체류시간 약 80 sec에서 제거율이 95%를 상회하는 결과를 얻을 수 있었다.¹⁰⁾ 본 실험에서는 4가지 media 중 제거율이 우수한 fiber 및 A/C를 충전물로 사용하였고, 반응온도 20~25°C, 체류시간을 80 sec로 설정하여 VOCs 및 악취물질(acetaldehyde, ethylalcohol, butanol, diethylamine, triethylamine)의 제거율을 고찰하였다.

Fig. 2는 A/C column을 이용하여 실험에 사용된 여러 VOCs 물질에 대한 제거율 실험을 수행 결과를 나타내었다. 각 물질의 부하율(loading rate)은 Table 2에 나타내었고, 모든 물질에 대하여 제거율이 97~99%로 나타났다.

실험 5일째 제거율이 감소하고, 압력손실이 최대 875 mmH₂O/m-bed까지 증가하였으나 역세척(back washing)을 한 결과, 제거율은 다시 상승하였다. 이러한 현상은 약 10일 후에 다시 나타났으며, 역세척 후 제거율은 다시 회복되었다. Biofilter 운전 시 column내 압력손실이 증가하면 유입되는 VOCs 및 악취가스의 흐름이 원활하지 못하게 되어 제거효율이 감소하게 되므로 정기적

Table 2. Results of removal efficiency for acetaldehyde, ethylalcohol, butylalcohol, triethylamine and diethylamine at about the same EBRT (80 sec)

Substrate	Fiber			A/C		
	Loading rate (g/m ³ ·hr)	Removal rate (g/m ³ ·hr)	Removal efficiency (%)	Loading rate (g/m ³ ·hr)	Removal rate (g/m ³ ·hr)	Removal efficiency (%)
Acetaldehyde	7.20	7.06	98.0	7.47	7.27	97.3
Ethylalcohol	5.65	5.58	98.7	5.81	5.69	97.9
Butylalcohol	2.84	2.83	99.8	2.86	2.85	99.8
Triethylamine	2.92	2.86	97.9	3.04	2.97	97.8
Diethylamine	2.33	2.28	97.8	3.80	3.72	97.9

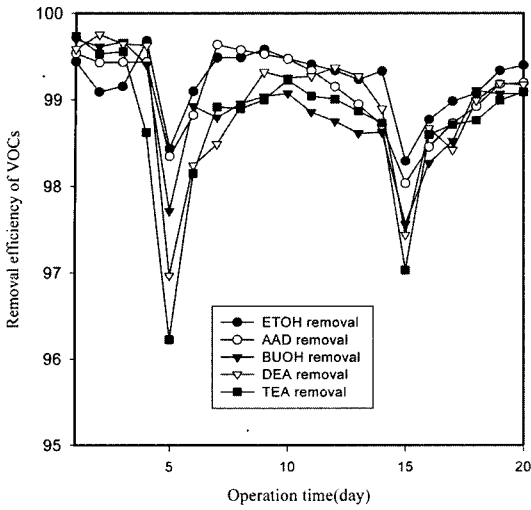


Fig. 2. Removal efficiency of VOCs and odor by A/C media. (residence time: 80 sec).

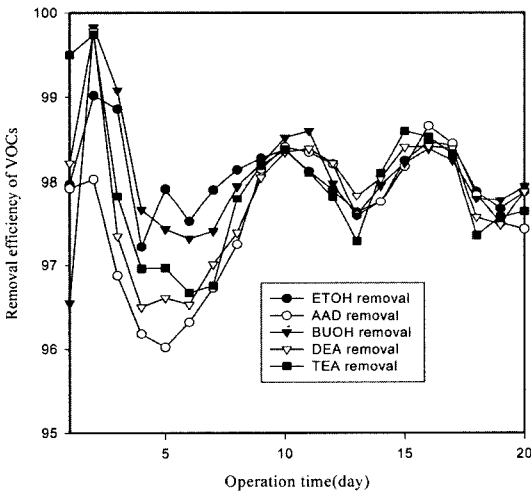


Fig. 3. Removal efficiency of VOCs and odor by fiber media. (residence time: 80 sec).

인 역세척을 실시하여 생물량을 조절하여 압력손실을 감소시켜야 한다.¹¹⁾

Fiber column(Fig. 3)에서도 모든 VOCs 및 악취물질(유입농도 100~130 ppm)의 제거율이 96~99%로 A/C column과 동일한 양상을 보였지만, 압력손실 최대치가 2,145 mmH₂O/m-bed로 A/C column보다 높은 경향을 나타내었다. 압력손실에 의하여 제거율이 감소하는 주기가 A/C column보다 약 2~3일 정도 빨리 도래하였고, 역세척을 실시한 후 제거율이 회복되는 기간도 A/C column보다 다소 길었다.

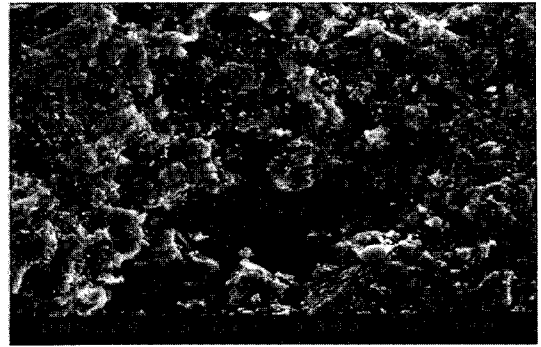


Fig. 4. SEM of the original surface of activated carbon.

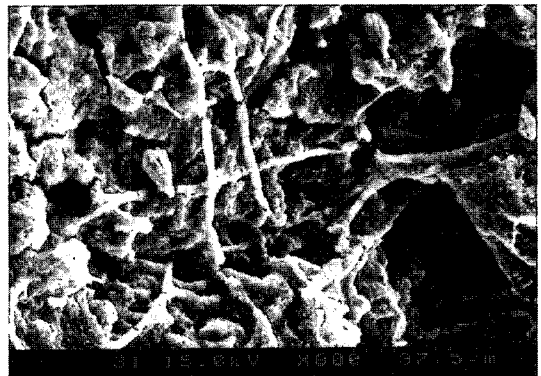


Fig. 5. SEM of the surface of A/C media with microorganisms.

2. 미생물 관찰

미생물에 의한 유기물질의 분해작용은 일반적으로 한 종의 미생물이 아닌 여러 가지 미생물이 상호 작용하여 공동대사(cometabolism) 등¹²⁾을 통해 이루어진다. 담체표면에 성장하고 있는 미생물을 관찰하기 위해 미생물 부착전의 담체와 column에 사용하여 미생물이 부착된 담체를 SEM(Scanning Electron Microscope)으로 확인한 결과를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 4에서 보면 사용 전 담체의 표면에는 미생물이 전혀 부착되어 있지 않지만, column에 투입하였던 담체인 Fig. 5는 담체의 표면에 많은 사상성 미생물이 우점종으로 서식하고 있는 것을 볼 수 있었다.¹³⁾ 본 실험에서 사용한 media는 미생물이 생존하기에 적합한 재질로 생각되어 진다.¹⁴⁾

3. 압력손실

Fig. 6은 실험기간동안 A/C column과 fiber column의 압력손실을 나타낸 것이다. A/C column의 초기 압력손실이 229 mmH₂O/m-bed로 fiber에 비하여 다소

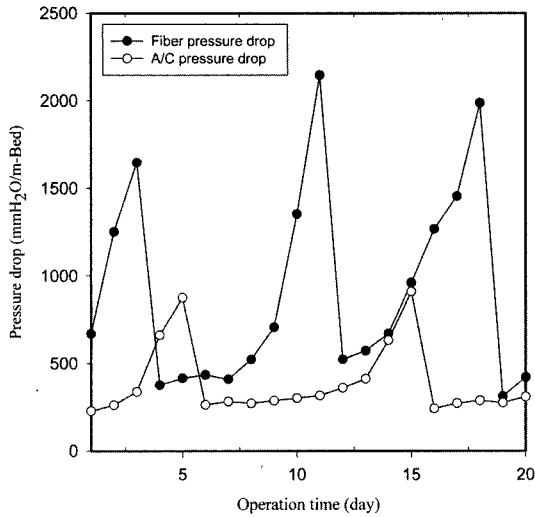


Fig. 6. Pressure drops of fiber bed and A/C bed.

낮은 경향을 보였다. 최대 압력손실은 910 mmH₂O/m-bed였으며, 역세척 후 압력손실은 242 mmH₂O/m-bed로 하락하였다. 실험 과정에서 4일 후 압력손실이 상승하면서 제거율이 낮아졌으며, 다시 압력손실이 상승하면서 제거율이 하락할 때까지 10일이 소요되었다.

Lee¹⁵⁾ 등의 실험에서는 장기간 동안 연속운전을 실시하여도 압력강하는 약 90 mmH₂O 정도인 것과 비교할 때, 본 실험에서는 압력손실이 높게 나타났다. 압력손실이 증가한 것은 다량으로 공급된 포기조액이 media 공극 내에 존재하고, 포기조액 중 biomass가 media의 공극을 메운 것이 원인으로 판단되었다.¹⁶⁾

Fiber column의 경우는 실험초기 압력손실이 670 mmH₂O/m-bed에서 시작하여 실험 2일 후 1,252 mmH₂O/m-bed, 3일 후 1,647 mmH₂O/m-bed로 상승하면서 제거효율도 급격히 하락하였다. 역세척 후 압력손실은 376 mmH₂O/m-bed로 감소하였고 제거효율도 시간이 지남에 따라 서서히 회복하는 경향을 보였다. 압력손실이 급격히 증가하면서 제거율이 하락한 것은 역세척 후 8일 뒤에 나타났다.

Fiber column의 초기 압력은 A/C column에 비하여 다소 높은 값을 나타내었다. 이는 과밀한 상태로 media를 설치하였고, 미생물 성장 조건을 유지시키기 위해서 공급한 다량 물이 media내에 존재하여 삼투압에 의해 압력손실이 상승된 것으로 판단된다. 제거율의 회복기간이 A/C column에 비하여 다소 길어진 것은 역세척할 때 섬모상 media에서 다량의 미생물이 탈리된 것으로 판단되어졌다.

각 column에서 diethylamine의 제거효율과 압력손실

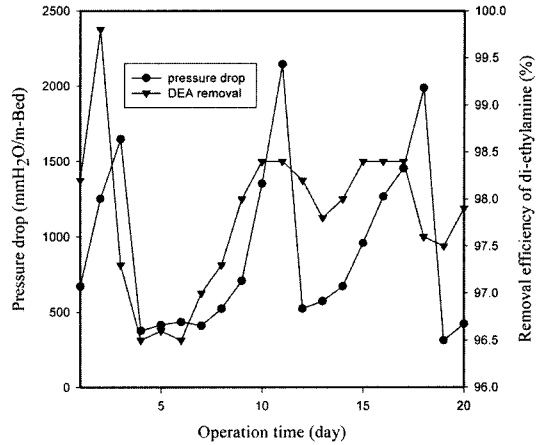


Fig. 7. Relation of pressure drop of bed and DEA removal efficiency using fiber media.

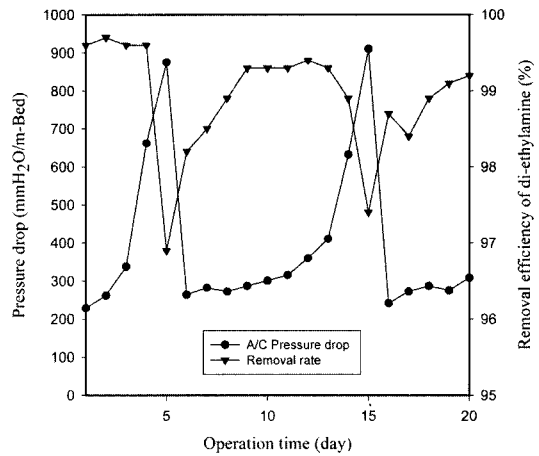


Fig. 8. Relation of pressure drop of bed and DEA removal efficiency using A/C media.

을 관찰한 결과를 Fig. 7과 8에 나타내었다. A/C column의 압력손실 변동 폭은 fiber column에 비해 작게 나타났으며, 역세척 후 제거효율이 회복되는 기간도 짧았다. 이는 활성탄의 비표면적이 fiber보다 현저히 커서 활성탄에 존재하는 미세한 공극에 미생물이 단단히 부착할 수 있어, fiber에 비해 상대적으로 탈리되는 미생물의 양이 적어 제거율 회복속도가 빠르기 때문으로 판단된다.

전반적으로 압력손실 값은 fiber column에서 높게 나타났다. Fiber column에서는 역세척 후 초기 압력손실 값이 376 mmH₂O/m-bed이었으며, 최고 압력손실 값은 2,145 mmH₂O/m-bed이었다. 반면에 A/C column은 역세척 후 초기 압력손실 값이 242 mmH₂O/m-bed였고,

최고 압력손실이 910 mmH₂O/m-bed였다. Bed porosity와 압력손실을 비교해 보면 fiber bed가 0.52로 A/C bed 0.43에 비해 높았지만, 압력손실 값이 상승한 이유는 media의 형상이 섬모상이어서 공급되어진 포기조액이 섬모와 섬모의 간극에 다량 부착한 물이 공극사이를 메워 삼투압¹⁷⁾에 의한 압력손실 값이 상승된 것으로 판단되었다.¹⁸⁾ 즉, BSTF 운전 시 물 공급량을 적정치 이상으로 투입하였을 경우, 압력손실이 증가한다는 것을 알 수 있었다. 또한 유입가스 공급량을 증가시켜 기체유입속도가 커지면 탑 내에 액정체량이 증가하여 액체가 아래로 이동하는 것을 방해하는 부하점(load point) 현상¹⁹⁾이 일어나는 것을 관찰할 수 있었다.

제거율을 비교하면 fiber의 경우는 제거율이 98% 전후를 나타내었고, A/C column은 99%의 제거율을 나타내었다. Biofilter media는 압력손실이 낮고, 미생물의 부착성능이 떨어질수록 제거효율은 양호하게 나타나는 것으로 판단되었다. Media 입자 size가 큰 화산석을 사용한 Cho 등의 결과와 비교하면 본 실험에서 사용한 BSTF의 압력손실은 높게 나타났다.²⁰⁾ 위의 결과를 바탕으로 압력손실이 증가되는 것은 media의 물리적인 압축에 의해서만 일어나는 것이 아니고 재질의 특성과 과잉으로 공급된 수분의 양에 비례하여 압력손실이 증가하고, VOCs 및 악취물질의 제거 과정에서 생성된 biomass가 공극을 막아 압력손실을 상승시킨 것으로 판단된다. 본 공정을 현장 적용을 위해 scale-up 할 경우 압력손실에 대한 충분한 대책을 마련하여야 할 것으로 판단된다.

4. Media의 용적변화 비교

Fiber, A/C column을 사용하여 미생물 부착 및 media에 따른 제거특성 비교 실험을 완료한 후 운전에 의한 media의 물리적 충격에 따른 파손과 압축에 의한

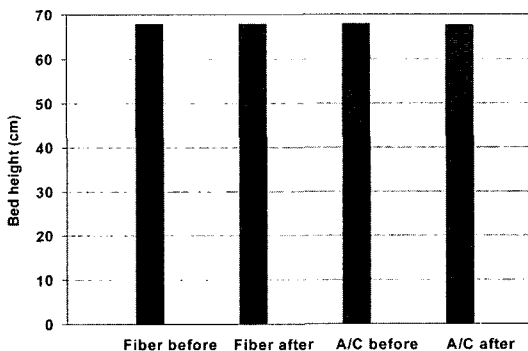


Fig. 9. Comparison of bed volume before and after experiments.

용적변화 정도를 측정된 결과를 Fig. 9에 나타내었다.

Fiber의 경우는 실험 기간 후에도 bed 높이의 변화는 나타나지 않았다. 이는 media의 상·하부를 지지체로 고정된 결과에 의한 것으로 생각되어진다.

A/C column의 경우는 약 20일의 실험기간 동안 초기 높이에서 약 0.44% 감소하여 부피변화율은 크게 나타나지 않았다. 입자의 크기가 큰 ceramic이 지지체 역할을 하고 그 사이에 활성탄이 충전되어 bed의 부피변화를 작게 한 것으로 판단되어진다. 활성탄 단독으로 사용한 경우 biofilter의 부피변화율이 증가될 수 있어 대부분의 biofilter는 부피변화율을 감소시키기 위해 혼합여재를 사용하고 있다.²¹⁾ A/C media의 경우도 혼합여재로 부피변화율이 크지 않은 것을 확인하였다.

IV. 결 론

Biofilter를 이용한 VOCs 및 악취물질의 제거에 있어서 미생물 담체(media)에 따른 제거 특성을 관찰한 결과 공극률과 담체의 물리적, 형태적 특성에 따라 제거율이 다르게 나타났다.

압력손실은 A/C column이 fiber에 비하여 다소 낮았으며, 최대 압력손실치가 A/C column에서는 910 mmH₂O/m-bed이고, fiber의 경우는 1,459 mmH₂O/m-bed로 나타났다. Fiber 담체의 외형이 섬모상으로 제작되었기 때문에 섬모사이에 수분조절을 위해 공급한 물이 공극을 메워 압력손실을 증가시킨 것으로 판단되어졌다.

증가한 압력손실을 감소시켜 제거율 회복을 위한 역세척을 실시하였을 때 섬모상 fiber의 경우는 담체 표면의 porosity가 낮고 표면이 평활하기 때문에 미생물이 서식 또는 부착할 공간이 부족하고, 역세척 시 미생물 개체수가 일정량 이상으로 washout되어 제거율이 회복되는 기간이 A/C column보다 길었다.

본 실험에서 사용한 담체 표면을 SEM으로 관찰한 결과 많은 미생물이 생존하고 있었고, 사상성 미생물이 우점종으로 성장하고 있는 것이 관찰되었다.

Media 충전층의 압축율은 fiber의 경우에는 media의 상·하부를 지지체로 고정하여 설치하였기 때문에 bed 높이는 설치 초기상태 그대로 유지되었다. A/C bed의 경우, 초기 높이가 68 cm에서 약 0.44%의 압축율을 나타내었다. 혼합담체 중 물리적 특성이 좋은 ceramic media가 지지체 역할을 하여 부피변화율이 감소되었다.

본 실험을 통하여 VOCs 및 악취물질의 제거율 및 압력손실은 media의 단순한 물리적 압축율에만 의존하는 것이 아니고, media 재질의 특성, 공급된 수분의

양, biomass의 양 등에 따라서 bed의 폐색에 의해 기체 및 액체상의 흐름을 방해하여 제거율 저하 및 압력 손실의 상승 등의 공정 운전특성이 변화되는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 2004년도 울산대학교의 연구년 국내파견 동안에 수행된 결과이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 한국산업안전공단 : VOC의 안전·환경적 처리기술. 120, 1998.
2. 하태욱, 최상준 : 악취 및 VOCs 제거를 위한 Biofilter 기술. 한국환경과학회지, **14**(1), 14-23, 2000.
3. Pirbazari, M., Ravindran, V., Badriyha, B. N., Craig, S. and McGuire, M. J. : GAC adsorber design protocol for the removal of off-flavors. *Wat. Res.*, **27**, 1153-1166, 1993.
4. Govind, R. and Bishop, D. F. : Recent advances in biofiltration. 20th annual RREL research symposium proceedings, USEPA-600-R-94-011. 115-121, 1994.
5. Oh, Y.-S. : Biofiltration of solvent vapors from air. Ph. D. thesis. Rutgers, The State University of New Jersey, New Jersey, 4-9, 1993.
6. Wittorf, F. J., Klein, K., Komer, O. U. and Ziehr, H. : Biocatalytic treatment of waste air. *Chem. Eng. Technol.*, **16**, 40-45, 1993.
7. Medina, V. F., Webster, T., Ramaratnam, M. and Devanny, J. S. : Treatment of gasoline residuals by granular activated carbon biological filtration. *J. Environ. Sci. Health*, **A30**, 407-422, 1995.
8. 감상규, 강경호, 임진관, 이민규 : 활성탄/폴리우레탄 복합담체를 충전한 바이오필터에서 H₂S의 제거특성. 한국환경과학회지, **13**(1), 47-53, 2004.
9. 홍성호, 이충식, 이재근 : 제올라이트/폴리에틸렌 복합 담체를 이용한 Biotrickling Filter에서 톨루엔 제거 특성. 대한환경공학회지, **27**(6), 573-580, 2005.
10. 박진도, 서경호, 이학성 : Biofilter에 의한 VOCs 및 악취물질의 제거특성에 관한 연구. 한국환경과학회지, 논문심사 중, 2005.
11. Winer, M. : Biofiltration; An innovative air pollution control technology for VOC emissions. *J. Air Waste Manage. Assoc.*, **41**(8), 104-111, 1991.
12. Oh, Y.-S. and Choi, S.-C. : Characterization of BTX-degrading bacteria and identification of substrate interactions during their degradation. *J. Microbiol.*, **35**, 193-199, 1997.
13. Dawson, D. S. : Biological treatment of gaseous emissions. *Wat. Env. Res.*, **65**, 368-371, 1993.
14. 이민규, 빈정인, 이병현, 김중균, 최혁, 권성현 : 화산석을 담체로 한 biofilter에서 황화수소 제거특성. 화학공학회지, **39**(3), 379-384, 2001.
15. 이민규, 전평균, 이동환, 감상규 : 활성탄/폴리우레탄 복합담체를 충전한 Biofilter에서 기상 Toluene의 제거. 공업화학회지, **14**(7), 864-868, 2003.
16. Victor F. Medina : Development of Biological Filters Using GAC as the packing material; Application for Treating Gasoline Vapors. *J. of Environmental Engineering*, **123**(6) 538-546, 1997.
17. Kim, J. O. : Removal of gaseous trichloroethylene and tetrachloroethylene by an activated carbon biofilter. *Environ. Eng. Res.*, **2**, 9-19, 1997.
18. Henry, J. G. and Gehr, R. : Odor control; an operator's guide. *J. Water Pollut. Contr. Fed.*, **51**, 2528-2537, 1980.
19. 유일증, 고완석, 이종집 : 단위조작, 보문당, 329, 2003.
20. Cho, K.-S., Hirai, M. and Shoda, M. : Degradation characteristics of hydrogen sulfide, methanethiol, dimethyl sulfide and dimethyl disulfide by *Thiobacillus thioparus* DW44 isolated from peat biofilter. *J. Ferm. Bioengineer*, **71**(6), 384-389, 1991.
21. Son, H.-K. : Pilot 규모의 바이오필터를 이용한 휘발성유기화합물 제거. 한국환경보건학회지, **30**(3), 245-252, 2004.