

바이오필터의 휘발성유기화합물 제거특성 및 탄소물질수지를 이용한 생물반응의 양론적 해석

Removal Characteristics of Volatile Organic Compounds in Biofilters and Stoichiometric Analysis of Biological Reaction by Carbon Mass Balance

김 대 근
Daekeun Kim

서울과학기술대학교 환경공학과

Department of Environmental Engineering, Seoul National University of Science and Technology

(2010년 5월 28일 접수, 2010년 8월 13일 채택)

Abstract : This study was performed to investigate the removal characteristics of volatile organic compounds (VOCs) in the gas-phase biofilters, and to propose a stoichiometric analysis approach to characterize biological reaction through carbon mass balance. The VOCs studied were toluene, styrene, methyl ethyl ketone (MEK), and methyl isobutyl ketone (MIBK) as a single substrate for each biofilter. The critical loading rate was determined to be 46.9 g/m³ · hr, 25.8 g/m³ · hr, 96.3 g/m³ · hr, and 66.5 g/m³ · hr for toluene, styrene, MEK, and MIBK, respectively. The obtained results indicated that the critical loading rate was well correlated the octanol-water partition coefficient. In the analysis of carbon mass balance, carbon recovery to CO₂ became relatively lower as substrate loadings increased, but higher for carbon recovery to biomass. Stoichiometric analysis revealed that biomass yield increased as substrate loadings increased, and its coefficient (g biomass/g substrate) varied from 0.31 to 0.57 for toluene, 0.29 to 0.57 for styrene, 0.08 to 0.56 for MEK, and 0.14 to 0.53 for MIBK.

Key Words : Biofilter, VOC, Critical Loading, Mass Balance, Biomass Yield

요약 : 본 연구는 바이오필터의 기질분해특성을 파악하기 위하여 휘발성유기화합물을 대상으로 임계부하량과 기질특성의 상관관계를 분석하였고, 탄소물질수지를 이용한 생물반응의 양론적 해석을 수행하였다. 반응기에 공급된 기질은 단일물질이며, toluene, styrene, MEK, MIBK를 선정하였다. 바이오필터의 기질임계부하량은 toluene은 46.9 g/m³ · hr, styrene은 25.8 g/m³ · hr, MEK는 96.3 g/m³ · hr, MIBK는 66.5 g/m³ · hr이었으며, 임계부하량은 옥탄올-물 분배계수(K_{ow})와 높은 상관관계를 보였다. 또한 기질부하량이 증가할수록 물질수지 중 CO₂에 의한 탄소회수율은 낮아졌고, 바이오매스에 의한 탄소회수율은 높아지는 경향을 보였다. 생물양론적 해석을 통하여 추정된 biomass yield (g biomass/g substrate)는 기질부하량이 증가할수록 커졌으며, toluene은 0.31~0.57, styrene은 0.29~0.57, MEK는 0.08~0.56, MIBK는 0.14~0.53의 변화폭을 보였다.

주제어 : 바이오필터, 휘발성유기화합물, 임계부하량, 물질수지, 세포수율

1. 서론

휘발성 유기화합물(VOC) 제거기술인 바이오필터는 처리 대상 물질을 미생물, 산소, 수분 및 영양물질 등이 충족되어 있는 충전물질에 통과시켜 이산화탄소와 물로 전환시키는 생물학적 처리공정이다.¹⁾ 바이오필터 기술은 처리효율 측면뿐만 아니라 환경성과 경제성 측면에서 우수한 장점을 가지고 있으며, 많은 연구와 실용화가 진행되어 왔다.^{2,3)}

바이오필터에서 성장하는 미생물은 충전담체에 부착 고정되어 덩어리 형태의 생물막(Biofilm)을 형성한다.⁴⁾ 일반적으로 바이오필터 생물막에는 호기성 미생물이 성장하며, 생물막이 과대 형성되어 산소전달에 한계가 있을 경우에는 생물막에서 탈질화균의 성장이 확인되기도 한다.^{5,6)} 바이오필터에 탈질화균이 성장할 경우에는 영양물질 과대공급 등의 외부적 요인에서 기인하는 폐색(clogging) 등의 바이오필터 운전상 문제를 동반할 수 있다. 따라서 바이오필터 기술의 효과적인 적용을 위해서는 반응기 미생물의 활성을 이해하

고, 이를 통하여 반응기 운전효율을 파악할 필요가 있다.^{7,8)}

바이오필터가 정상적으로 운전될 경우에는 호기성 미생물 반응에 기초하여 생물학적 반응을 해석하는 것이 일반적이다. 호기성 미생물에 의한 유기물질의 생물화학적 반응은 유기물질의 산화분해반응과 세포물질 합성반응으로 구분되며, 특히 유기물질의 산화분해는 미생물 성장에 필요한 에너지를 얻기 위한 과정이다.⁹⁾ 따라서 바이오필터 미생물의 활성을 이해하기 위해서는 반응기에서 일어나는 두 반응을 이해할 필요가 있다.⁸⁾ 지금까지 많은 연구자들은 이 분야에 대한 이론적 또는 실험적 접근을 시도하여 왔다. 이론적 접근은 수학적 모델을 적용하여 미생물의 활성과 기질분해를 해석하였으며,¹⁰⁻¹²⁾ 실험적 접근은 미생물 종을 분석하거나 반응기내에 생성되는 바이오매스를 공간적 또는 시간적으로 분석하였다.^{8,13,14)} 또한 반응기내 이산화탄소 발생량과 바이오매스 생성량을 실험적으로 측정하여 반응기 물질수지를 해석하고 이를 적용하여 반응기 운전특성을 분석하는 연구도 진행되어 왔다.^{15,16)} Mutafov 등¹⁷⁾과 Jorio 등¹⁸⁾

의 연구에서는 바이오필터의 생물반응을 해석하기 위해 양론적 해석(stoichiometric analysis)을 적용하여 휘발성유기화합물의 제거특성, 미생물성장률, 미생물량 생성을 해석하였다.

본 연구는 4종의 휘발성유기화합물(toluene, styrene, methyl ethyl ketone, methyl isobutyl ketone)을 단일 기질로 공급하여 장기간 운전한 바이오필터를 대상으로 기질부하량에 따른 기질분해특성을 분석하기 위해 수행되었다. 우선 바이오필터의 기질제거 특성을 제거효율 측면에서 분석하여 기질특성과의 상관관계를 파악하였고, 탄소물질수지를 이용하여 반응기내 생물반응의 특성을 양론적으로 해석하였다.

2. 실험방법

2.1. 실험장치

본 연구에서는 총 4가지의 휘발성 유기화합물을 단일기질로 하는 총 4기의 실험실규모 바이오트리클링필터(bio-trickling filter, 이후 명칭구분 없이 바이오필터로 명명함)를 개별적으로 운전하였다. 바이오필터는 총 7기의 유리재질 원통실린더(Ace Glass Inc., Vineland, NJ)가 결합된 형태이며, 실린더는 시료를 채취할 수 있는 시료채취구를 장착한 밀폐형 반응기로 제작되었다. 실린더 내부반경은 76 mm이며, 반응기 높이는 130 cm로 전체부피가 $5.89 \times 10^3 \text{ m}^3$ 이다.

바이오필터 반응기는 무기질 구조토류의 담체(Celite® 6 mm R-635 Bio-Catalyst Carrier)로 충전되었으며, 충전깊이는 60 cm로 전체 충전부피는 $2.72 \times 10^3 \text{ m}^3$ 이었다. 충전담체는 직경 0.635 cm, 길이 0.64 cm, 표면적 $11.9 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$, 겉보 기밀도 $0.62 \text{ g}/\text{cm}^3$ 의 다공질 원통구조이다.

실험에 사용된 공기는 기체유량계(Balston FTIR purge gas generator, Paker Hannifin Co., Tewksbury, MA)를 통해 바이오필터에 공급되었으며, 공급 전에 수분, 이산화탄소, 기타 오염물질을 제거하였다. 공기의 유속은 가스유량계(MKS model 247C four-channel read-out mass flow controller, Andover, Mass)를 이용하여 조절되었다. 액상의 휘발성 유기화합물은 실린지 펌프(Harvard Apparatus, model NP 70-2208, Holliston, MA)를 이용하여 공기흐름 중에 직접 주입되었다.

영양물질을 함유한 완충용액은 액체유량계(Danaher Controls, Eagle Signal Model MX1902, Gurnee, IN)를 이용하여 정량으로 개별 바이오필터에 공급되었다. 영양물질은 Sorial 등¹⁹⁾의 연구에 준하여 질소·인 등의 다량영양소 물질과 비타민 등의 미량영양소 물질을 포함하며, COD:N:P가 100:2:0.5로 유지되도록 하였다. 질소는 질산염형태로 반응기에 공급되었다. 완충용액의 pH는 NaHCO_3 을 이용하여 7.5~8.0이 유지되었다. 완충용액은 반응기 충전담체의 상부 표면에 1분 간격으로 1회(1~3초) 분사하여 공급유량을 1.5~2.4 L/day로 조정하였다. 공기와 영양염류는 하향류식으로 공급되었으며, 반응기는 20°C로 유지되는 항온실에서 운전

되었다.

2.2. 실험조건

본 연구의 반응기를 운전하기 위한 조건은 Table 1에 제시되었다. 실험대상물질에는 방향족 휘발성유기화합물인 톨루엔(toluene, C_7H_8)과 스타이렌(styrene, C_8H_8), 산소를 포함한 비균질 탄화수소인 메틸에틸케톤(methyl ethyl ketone; MEK, $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}$)과 메틸이소부틸케톤(methyl isobutyl ketone; MIBK, $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}$)이 선정되었다. 반응기에 유입되는 기질농도는 저농도에서 고농도로 단계적으로 증가시켰다.

바이오필터 충전담체는 도시하수처리장 2차침전조(Mill-creek wastewater treatment plant, Cincinnati, USA)에서 채취한 슬러지의 상등수를 이용하여 호기성 미생물군을 식종하여 실험에 사용되었다. 또한 과성장된 바이오매스에 의한 충전담체의 공극폐색을 방지하기 위하여 완충용액을 이용한 역세척을 주기적으로 수행하였다. 역세척 주기와 지속시간은 1주일에 1회 1시간이었으며, 반응기내 바이오매스 누적이 현저하게 관찰될 경우에는 역세척 주기를 짧게 했다. 이 방법은 반응기의 바이오매스 누적에 따른 압력저하를 사전에 방지하는 효과가 있는 것으로 보고되고 있다.^{20,21)}

2.3. 분석방법

가스시료는 각 반응기의 시료채취구에서 gas-tight syringes를 이용하여 직접 채취하여 분석하였다. 시료의 유기물질 농도분석은 불꽃이온화검출기(flame ionization detector, FID)가 장착된 가스크로마토그래피(HP5890, Series II, Hewlett Packard, Palo Alto, CA)를 이용하였으며, CO_2 농도는 열전도도검출기(thermal conductivity detector, TCD)가 장착된 가스크로마토그래피(GC HP5890, Series II, Hewlett Packard, Palo Alto, CA)를 이용하였다.

유입·유출구에서 채취된 액체시료를 대상으로는 질산염(nitrate), 용존 총탄소(dissolved total carbon, TC), 용존 무기탄소(dissolved inorganic carbon, IC), 휘발성 부유물질(volatile suspended solids, VSS)의 농도를 각각 분석하였다. 질산염은 자외선분광광도계(UVmini 1240 UV-Vis spectrophotometer, Shimadzu Corp., Tokyo, Japan), TC와 IC는 TOC분석기(Shimadzu TOC 5000, Shimadzu Corp., Tokyo, Japan)를 이용하여 분석하였다. 시료는 분석 전에 $0.45 \mu\text{m}$ nylon filter을 이용하여 여과하였다. VSS는 Standard Methods 2540G²²⁾에 준하여 분석하였다. 또한 역세척 후 발생된 역세척 용액도 동일한 분석을 실시하였다.

Table 1. Biofilter operating conditions

Item	Toluene	Styrene	MEK	MIBK
Inlet Concentration, ppmv	50~400	50~200	50~400	50~200
Loading Rate, $\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{hr}$	9.3~93.7	8.7~43.0	11.9~120	16.7~83.2
Buffered Liquid, L/day	2.4	2.4	1.5	1.5
Operational Periods, day	326	322	319	312

2.4. 물질수지 해석방법

물질수지는 바이오필터 반응기를 유입 또는 유출하는 모든 물질성분을 탄소량으로 환산하여, 기질분해에 따른 탄소회수율로 나타내었다. 탄소회수 경로는 식 (1)에서 볼 수 있듯이, 기체와 액체 중의 탄소량과 유출되는 기체와 액체 중의 탄소량을 비교하여 표현하였다.

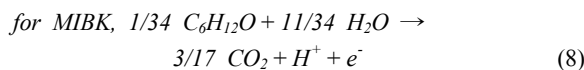
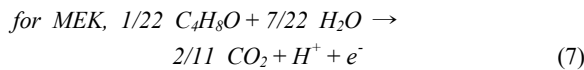
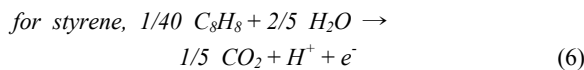
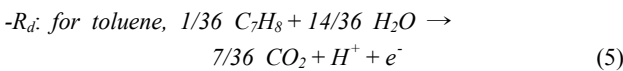
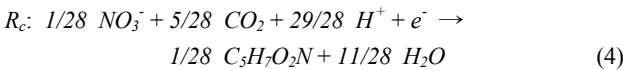
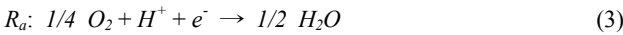
$$C_T = C_{CO_2} + C_{IC} + C_{TOC} + C_{VSS} + C_{unaccounted} \quad (1)$$

식 (1)에서 C_T 는 반응기에서 제거된 전체 VOC량을 탄소에 환산한 값이며, C_{CO_2} 는 유출가스 내 CO_2 량의 탄소환산값, C_{IC} 는 유출용액 중 무기탄소성분의 탄소환산값, C_{TOC} 는 유출용액 중 총유기탄소의 탄소환산값, C_{VSS} 는 반응기에 유출된 VSS성분의 탄소환산값, $C_{unaccounted}$ 는 실험적으로 회수되지 않은 탄소환산값이다. VSS의 탄소환산을 위하여 일반적 호기성 미생물 조성식인 $C_5H_7O_2N$ 을 이용하였다.

물질수지는 반응기 내 생물반응의 기초자료로 이용되었으며, 생물반응의 해석방법은 다음과 같다. 호기성 조건에서 휘발성 유기화합물의 생물학적 분해 반응은 다음 식 (2)와 같으며, 전자수용체 반쪽반응(R_a), 세포합성 반쪽반응(R_c), 전자공여체 반쪽반응(R_d)으로 구분하여 해석될 수 있다.⁹⁾

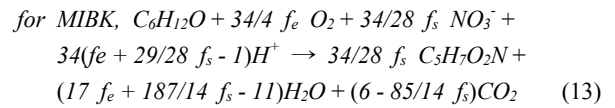
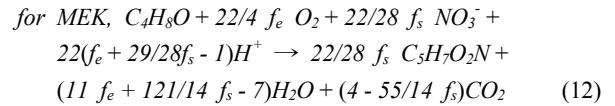
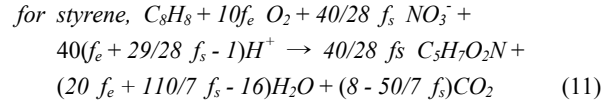
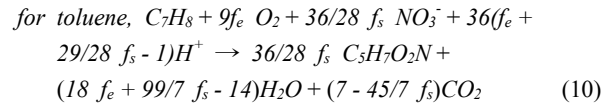


반쪽반응에 의한 해석은 다음 식 (3)~(8)과 같다. R_a 는 전자공여체의 산화반응이기 때문에 (-)기호를 첨가하여 표현한다.



위 식 (3)~(8)에서 전자는 세포합성반응과 산화분해반응에 공동적으로 이용된다. 각 반응에 이용되는 전자를 분율로 표현하여 f_e 와 f_s 라고 정의하면, f_e 와 f_s 의 합은 1.0이 된다. 이를 전체반응식(overall reaction, R)에 적용하면 다음과 같다.

$$R(\text{overall reaction}) = f_e R_a + f_s R_c - R_d \quad (9)$$



본 해석에 적용된 가정은 다음과 같다. 1) 기질은 정상상태(steady state)로 유입되었고, 2) 미생물의 내생호흡과 탈질반응은 일어나지 않았으며, 3) 중간생성물이 발생되지 않았고, 4) 산소 저해현상 또는 기질저해현상이 일어나지 않았다. 따라서 본 연구에서는 물질수지를 기질부하량별로 구분하여 해석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 바이오필터의 VOC제거특성

Fig. 1은 실험대상기질의 유입부하량에 따른 바이오필터의 기질분해능을 보여주고 있다. 본 연구에서는 반응기의 대상기질 분해능을 효과적으로 비교하기 위하여 유입부하

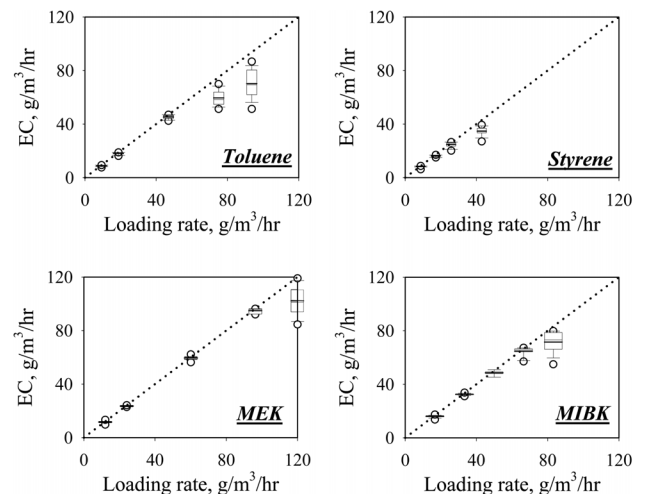


Fig. 1. Elimination capacities (EC) for VOCs of concern as a function of their loadings. The dotted lines represent 100% removal.

량별 초기순응기간에 해당하는 실험값은 Fig. 1에 포함되지 않았으며, 대상기질의 임계부하량(critical loading rate)을 이용하여 바이오필터의 분해능을 비교하고자 하였다. 임계부하량은 유입물질의 제거효율이 99%에 도달할 수 있는 기질의 최대유입부하량을 의미한다. Fig. 1로부터 바이오필터의 기질 임계부하량을 유추하여 보면, toluene은 $46.9 \text{ g/m}^3 \cdot \text{hr}$, styrene은 $25.8 \text{ g/m}^3 \cdot \text{hr}$, MEK는 $96.3 \text{ g/m}^3 \cdot \text{hr}$, MIBK는 $66.5 \text{ g/m}^3 \cdot \text{hr}$ 이었다.

Fig. 2는 도출된 바이오필터 임계부하량을 기질의 물리·화학·생물학적 특성과 비교한 결과이다. 본 연구에 적용된 기질특성은 옥탄올-물 분배계수(octanol-water partition coefficient), 헨리상수(Henry's law constant), 생태독성농도(EC50) 자료이다. 기질의 옥탄올-물 분배계수는 물질의 환경매체에서의 거동을 결정하는 중요한 물리화학적 특성이고, 토양과 침전물의 생물농축계수와 생태독성, 흡착과 관련이 있다.²³⁾ 특히, 바이오필터의 기질 전달현상을 가스-물-바이오매스 사이의 물질이동으로 볼 경우에 옥탄올-물 분배계수는 기질의 물-바이오매스 분배를 해석하는데 이용될 수 있고,²⁴⁾ 생태독성농도와 기질분해 상관관계와도 연관해서 해석될 수 있다. 헨리상수는 가스분압과 액상농도의 분배계수로서 바이오필터의 가스-물 사이의 물질이동을 해석하는데 적용되며, 일반적으로 기질의 헨리상수가 작을수록 바

이오필터의 기질분해능은 높아진다고 알려져 있다.^{25,26)} 본 연구에서는 바이오필터의 기질 임계부하량과 옥탄올-물 분배계수의 상관관계($r^2 = 0.922$, $p < 0.05$) 및 생태독성농도의 상관관계($r^2 = 0.909$, $p < 0.05$)가 높은 것으로 조사되었다. 기질 임계부하량과 헨리상수의 상관관계($r^2 = 0.512$, $p > 0.05$)는 다소 낮았지만, 헨리상수가 작은 기질이 상대적으로 높은 임계부하량을 보여주고 있다. 본 연구에서 이용된 바이오필터는 액상이 반응기 내부에 간헐적으로 공급되는 트리클링 필터(trickling filter) 방식의 생물반응기이기 때문에, 물-가스 물질전달은 기질의 전체물질전달에 미치는 영향이 상대적으로 작을 것으로 판단된다. 그 이유는 기질분해가 실질적으로 일어나는 공간을 바이오필터의 담체표면에서 바이오매스가 형성되는 생물막(biofilm)이고, 생물막에서 산소저해현상(oxygen limitation)이 일어나지 않았다고 가정한다면, 가스-물 물질전달과 비교하여 물-바이오매스 물질전달이 전체물질전달에서 비중이 큰 영향인자가 될 수 있기 때문이다. Zhu 등²⁷⁾의 연구에서도 유사한 결과가 도출되었으며, 특히 Alonso 등²⁸⁾은 무차원 헨리상수값이 0.01보다 작은 값을 가진 기질을 비교한 실험에서 헨리상수와 기질분해의 상관관계가 다소 낮다고 보고하였다. 따라서 본 연구에 적용된 기질 중 MEK와 MIBK의 무차원 헨리상수값이 각각 0.0019와 0.00062인 점을 고려해 본다면, 헨리상수와 기질분해의 상관관계가 낮게 나온 분석결과의 타당성을 가늠할 수 있겠다.

3.2. 물질수지

Table 2에는 식 (1)을 이용하여 기질별 유입부하량에 따른 탄소회수율을 보여주고 있다. 우선 모든기질의 유입부하량이 증가할수록 CO₂에 기인하는 탄소회수율은 낮아지고, 유출수 내 무기탄소에 의한 탄소회수율은 다소 높아짐을 볼 수 있다. 유출수 내 무기탄소는 바이오필터에 간헐적으로 공급된 완충용액의 성분물질 중 NaHCO₃에서 기인하며, 대부분 HCO₃⁻ 형태(반응기 pH 7.5~8.0 유지)로 존재할 수 있다. 또는 기질유입부하량이 증가할수록 생물학적 CO₂발생량은 상대적으로 증가하기 때문에 이에 상응한 CO₂의 기체-액체 상평형에 의해 유출수 내 용존 CO₂가 증가할 가능성이 높을 것으로 판단된다.

유출수 중 VSS에 의한 탄소회수율은 기질유입부하량이 증가할수록 높았고, 이 경향은 친수성 비균질탄화수소인 MEK와 MIBK에서 더욱 뚜렷하게 나타났다. 하지만 임계부하량 이상으로 기질이 유입될 경우에는 VSS 탄소회수율이 다소 낮아지는 경향을 보였다. 이는 실험적으로 회수되지 않은 탄소회수율(C_{unaccounted})로 설명될 수 있다. 본 연구에서는 반응기 담체에 누적되는 바이오매스를 역세척에 의하여 주기적으로 제거하였다. 또한 역세척 과정에 상당량의 탄소가 회수되었으며, 그 양은 전체 VSS회수율의 19~20%에 해당하였다. 하지만 주기적 역세척으로 담체를 세척할지라도 바이오매스의 반응기내 축적은 피할 수 없는 현상이기 때문에 물질수지에서 밝혀지지 않은 상당량의 탄소가 존재할

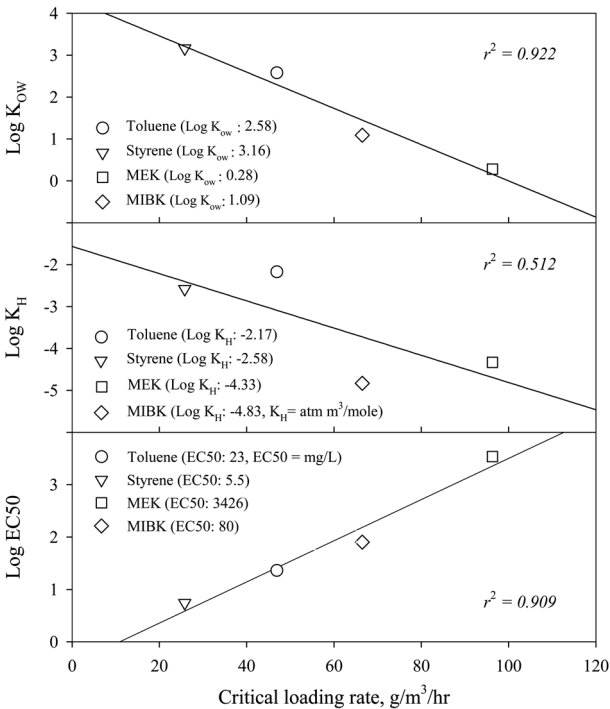


Fig. 2. Correlation between critical loading rates for VOCs and their physicochemical properties: Octanol-water partition coefficient (Log K_{ow}) and Henry's law coefficient (K_H, atm · m³/mole) were obtained from Watts.²³⁾ Ecotoxicity (EC50, mg/L) of VOCs to photobacterium phosphoreum by the Microtox[®] test was obtained from the ecotoxicity reviews data.³¹⁾ The line of best linear fit is included in each plot.

Table 2. Carbon recovery* at different inlet for VOC-loaded biofilter

VOC studied	Loading Rate g/m ³ · hr	^a C _{CO2} %	^b C _{IC} %	^c C _{TOC} %	^d C _{VSS} %	C _{unaccounted} %
Toluene	9.3	79.9	0.4	1.5	14.3	4.0
	18.8	75.0	0.6	0.8	12.3	11.3
	46.9**	69.2	0.2	0.0	15.4	15.2
	75.1	69.6	0.3	1.5	12.0	16.6
	93.7	63.2	0.3	0.1	15.5	20.9
Styrene	8.7	81.4	0.5	1.1	13.9	3.1
	17.2	68.6	0.6	0.5	16.3	14.0
	25.8**	71.6	0.6	0.2	18.3	9.3
	43.0	63.5	0.6	0.6	16.9	18.4
MEK	11.9	86.2	0.1	5.9	7.0	0.8
	24.1	70.9	1.1	1.2	13.5	13.3
	60.1	62.3	2.0	0.9	20.9	13.9
	96.3**	54.8	3.8	0.9	17.9	22.6
	120.0	46.9	3.8	1.9	14.1	33.3
MIBK	16.7	89.5	0.6	2.1	7.3	0.5
	33.3	67.1	0.9	0.8	17.5	13.8
	50.0	55.6	3.6	1.4	22.4	17.0
	66.5**	45.8	3.3	2.3	26.2	22.4
	83.2	50.4	2.1	1.5	20.5	25.5

* Carbon recovery: C_{VOC removed} = ^aC_{CO2} in effluent gas + ^bC_{Inorganic carbon in effluent liquid} + ^cC_{Total organic carbon in effluent liquid} + ^dC_{VSS in effluent liquid and backwashing solution} + C_{Biomass retained in the reactor}. A typical cellular composition for a heterogeneous microorganism is represented as C₅H₇O₂N. Carbon recovery analysis was based on the experimental data obtained during the experimental period with consistent VOC loading rates.

** Values indicate the critical loading rates of the given substrates

수 있다. 따라서 담체에 축적되어 물질수지 해석에 포함되지 않았던 바이오매스를 회수되지 않은 탄소값(C_{unaccounted})로 가정하여 반응기의 생물반응을 해석할 수 있다.

3.3. 생물반응의 양론적 해석

Table 2에 제시된 기질부하량에 따른 물질수지 자료 중 CO₂로 회수된 탄소회수율(C_{CO2})을 식 (10)~(13)에 대입하여 *f_e*와 *f_s*를 도출하면, 기질임계부하량에서 생물양론적 반응을 다음 식 (14)~(17)와 같이 나타낼 수 있다. 일반적으로 바이오필터의 생물반응은 반응기의 깊이와 운전기간에 따라 다르게 나타나지만,⁸⁾ 본 연구에서 도출된 생물양론식 식 (14)~(17)은 기질에 따른 생물반응을 전반적으로 이해하는데 유용하게 이용될 수 있다.

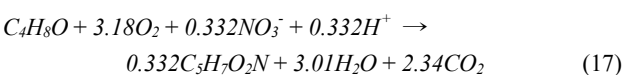
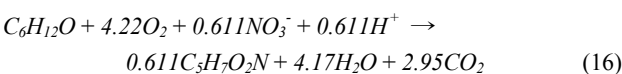
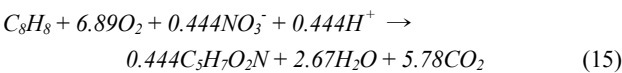
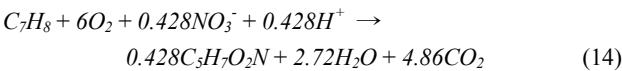


Fig. 3에는 세포합성반응과 산화분해반응에 이용된 전자 분율(*f_s*, *f_e*)과 기질부하량의 관계를 보여주고 있다. 낮은 기질부하량에서는 세포합성보다는 세포활동에 필요한 에너지 생성이 생물반응의 주된 반응으로 작용하였고, 반대로 높은 기질부하량에서는 세포합성이 점차적으로 활발히 일어났음을 유추할 수 있다. 이는 임계부하량을 초과한 높은 기질부하량에서 바이오필터의 담체가 과성장한 바이오매스에 의해 폐쇄되어 기질제거효율이 낮아지는 현상을 간접적으로 추론할 수 있는 결과라고 할 수 있겠다.

생물반응기의 바이오매스 생성량을 기질소모량으로 나눈 값인 biomass yield는 생물학적 반응의 수치해석을 비롯한 바이오필터의 운전해석에 유용하게 이용된다. 대부분의 연구에서는 반응기 및 운전형태, 기질종류에 따라 일정한 값의 biomass yield값을 적용하고 있다. Shareefdeen와 Baltzis의 연구²⁹⁾에서는 toluene을 대상으로 0.708 g biomass/g substrate을 적용했으며, Alonso 등³⁰⁾의 연구에서는 diethyl ether를 대상으로 0.35 g biomass/g substrate을 적용했다. 하지만 기질부하량에 따라 생물반응 기작이 달라질 수 있기 때문에 기질부하량에 맞는 biomass yield 값이 필요하다. 본 연구에서는 식 (18)을 이용하여 기질부하량에 따른 biomass yield 변화값을 제시하였다.

$$Y = \delta \frac{MW_{biomass}}{MW_{substrate}} \quad (18)$$

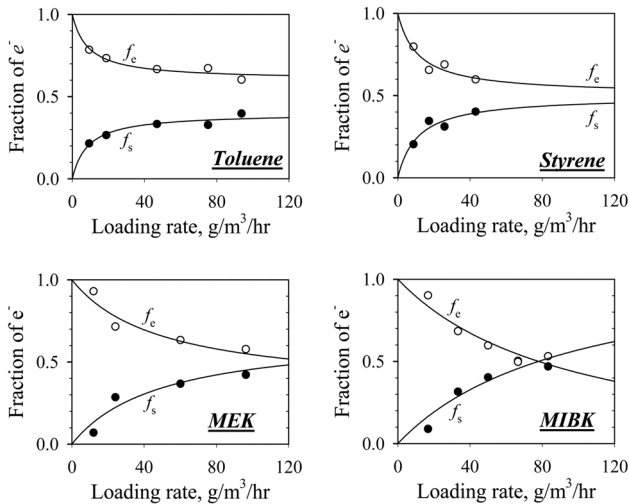


Fig. 3. Relationship between the fraction of electrons used for energy generation (f_e) and synthesis (f_s) and substrate loading.

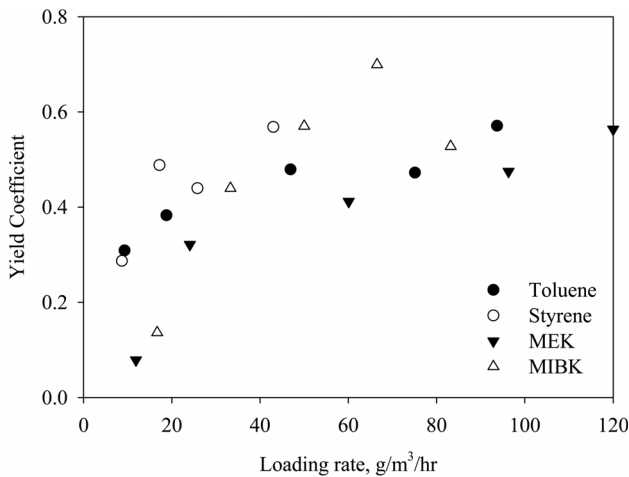


Fig. 4. Biomass yield coefficients (g Biomass/g VOC) as a function of substrates loaded into the biofilters studied.

식 (18)에서 Y 는 biomass yield(g biomass/g substrate)이고, δ 는 식 (2)에 제시된 양론식의 계수, MW_{biomass} 는 미생물 조성식($C_5H_7O_2N$)의 분자량(g), $MW_{\text{substrate}}$ 는 대상기질의 분자량(g)이다.

Fig. 4에서 biomass yield값은 기질부하량이 증가할수록 biomass yield값은 커지는 경향을 보였다. 특히 toluene이 기질로 사용될 경우에는 biomass yield는 0.31~0.57이었다. Mutafov 등¹⁷⁾은 암모니아(NH_3)을 질소원으로 Chemostat반응기 실험을 수행하였고, toluene의 유입농도에 따라 biomass yield의 변화폭은 0.39~0.84를 나타내었다. 일반적으로 미생물이 암모니아를 질소원으로 이용할 경우 질산염보다 바이오매스 발생량이 많은 것으로 알려져 있다.²¹⁾ 또한 본 연구에서 styrene은 0.29~0.57, MEK는 0.08~0.56, MIBK는 0.14~0.53의 biomass yield 변화를 보였다. 본 연구에서 분석된 biomass yield 변화값은 기존 바이오필터 미생물의 성장을 예측한 모델식에 적용하기에는 한계가 있을 수 있다. 왜냐하

면 대부분의 모델식에서 biomass yield값은 파라미터(parameter) 추정결과에 따라 예측되고 있기 때문이다. 하지만 보다 향상된 수학적 모델식을 얻기 위해서는 기질부하에 따른 biomass yield값 변화를 적절히 고려할 필요가 있다고 판단된다.

4. 결론

본 연구는 toluene, styrene, MEK, MIBK를 단일기질로 공급한 바이오필터의 기질 제거특성과 탄소물질수지를 이용하여 생물반응을 양론적으로 해석하였다. 실험분석을 통해 도출된 연구결론은 다음과 같다.

- 1) 실험에 적용된 바이오필터의 기질 임계부하량은 toluene은 $46.9 \text{ g/m}^3 \cdot \text{hr}$, styrene은 $25.8 \text{ g/m}^3 \cdot \text{hr}$, MEK는 $96.3 \text{ g/m}^3 \cdot \text{hr}$, MIBK는 $66.5 \text{ g/m}^3 \cdot \text{hr}$ 이었으며, 임계부하량은 옥탄올-물 분배계수(K_{ow})와 높은 상관관계를 보였다.
- 2) 기질부하량이 증가할수록 물질수지 중 CO_2 에 의한 탄소회수율은 낮아졌고, 바이오매스에 의한 탄소회수율은 높아졌다.
- 3) 물질수지 중 CO_2 에 의한 탄소회수율은 이용하여 기질부하량에 따른 생물양론식을 도출할 수 있었다. Biomass yield (g biomass/g substrate) 값은 기질부하량이 증가할수록 커졌으며, toluene은 0.31~0.57, styrene은 0.29~0.57, MEK는 0.08~0.56, MIBK는 0.14~0.53의 변화폭을 보였다.

사사

본 연구는 2009년 서울산업대학교 학술연구비(신임교수 과제) 지원에 의하여 일부 수행되었습니다. 본 연구의 실험장치 지원 및 분석에 도움을 준 University of Cincinnati(미국)의 George A. Sorial 교수님께 감사드립니다.

KSEE

참고문헌

1. 남궁완, 박준석, 이노섭, “바이오필터 기술의 원리와 적용에 관한 고찰,” 한국유기성폐자원학회지, **8**(1), 60~68(2000).
2. Deshusses, M. A., “Biological waste air treatment in biofilters,” *Curr. Opin. Biotechnol.*, **8**(3), 335~339(1997).
3. Mudliar, S., Giri, B., Padoley, K., Satpute, D., Dixit, R., Bhatt, P., Pandey, R., Juwarkar, A., and Vaidya, A., “Bio-reactors for treatment of VOCs and odours - A review,” *J. Environ. Manage.*, **91**(5), 1039~1054(2010).
4. 송지현, “미생물반응기를 이용한 악취 및 휘발성유기화합물 저감기술의 적용사례 및 발전방향,” 대한환경공학회지, **28**(11), 1118~1125(2006).

5. Zhu, X. Q., Alonso, C., Suidan, M. T., Cao, H. W., Kim, B. J. and Kim, B. R., "The effect of liquid phase on VOC removal in trickle-bed biofilters," *Water Sci. Technol.*, **38**(3), 315~322(1998).
6. du Plessis, C. A., Kinney, K. A., Schroeder, E. D., Chang, D. P. Y. and Scow, K. M., "Denitrification and nitric oxide reduction in an aerobic toluene-treating biofilter," *Biotechnol. Bioeng.*, **58**(4), 408~415(1998).
7. Song, J. H. and Kinney, K. A., "Effect of vapor-phase bioreactor operation on biomass accumulation, distribution, and activity: Linking biofilm properties to bioreactor performance," *Biotechnol. Bioeng.*, **68**(5), 508~516(2000).
8. Kim, D. and Sorial, G. A., "Role of biological activity and biomass distribution in air biofilter performance," *Chemosphere*, **66**(9), 1758~1764(2007).
9. Rittmann, B. E. and McCarty, P. L., *Environmental biotechnology: principles and applications*, McGraw-Hill, Boston, pp. 126~144(2001).
10. Smith, F. L., Sorial, G. A., Suidan, M. T., Biswas, P. and Brenner, R. C., "Development and demonstration of an explicit lumped-parameter biofilter model and design equation incorporating Monod kinetics," *J. Air Waste Manage. Assoc.*, **52**(2), 208~219(2002).
11. Song, J. Y. and Kinney, K. A., "A model to predict long-term performance of vapor-phase bioreactors: A cellular automaton approach," *Environ. Sci. Technol.*, **36**(11), 2498~2507(2002).
12. Iliuta, I. and Larachi, F. ç., "Modeling simultaneous biological clogging and physical plugging in trickle-bed bioreactors for wastewater treatment," *Chem. Eng. Sci.*, **60**(5), 1477~1489(2005).
13. Cai, Z., Kim, D., Sorial, G. A., Saikaly, R., Zein, M. M. and Oerther, D. B., "Performance and microbial diversity of a trickle-bed air biofilter under interchanging contaminants," *Eng. Life Sci.*, **6**(1), 37~42(2006).
14. Chung, Y.-C., "Evaluation of gas removal and bacterial community diversity in a biofilter developed to treat composting exhaust gases," *J. Hazard. Mater.*, **144**(1-2), 377~385(2007).
15. Grove, J. A., Zhang, H. X., Anderson, W. A. and Moo-Young, M., "Estimation of carbon recovery and biomass yield in the biofiltration of octane," *Environ. Eng. Sci.*, **26**(10), 1497~1502(2009).
16. Song, J., Ramirez, J. and Kinney, K. A., "Nitrogen utilization in a vapor-phase biofilter," *Water Res.*, **37**(18), 4497~4505(2003).
17. Mutafov, S., Angelova, B., Schmauder, H. P., Avramova, T. and Boyadjieva, L., "Stoichiometry of microbial continuous-flow purification of toluene-contaminated air," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **65**(2), 228~234(2004).
18. Jorio, H., Brzezinski, R. and Heitz, M., "A novel procedure for the measurement of the kinetics of styrene biodegradation in a biofilter," *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, **80**(7), 796~804(2005).
19. Sorial, G. A., Smith, F. L., Suidan, M. T., Pandit, A., Biswas, P. and Brenner, R. C., "Evaluation of trickle-bed air biofilter performance for styrene removal," *Water Res.*, **32**(5), 1593~1603(1998).
20. Kim, D., Cai, Z. and Sorial, G. A., "Evaluation of trickle bed air biofilter performance under periodic stressed operating conditions as a function of styrene loading," *J. Air Waste Manage. Assoc.*, **55**(2), 200~209(2005).
21. Smith, F. L., Sorial, G. A., Suidan, M. T., Breen, A. W., Biswas, P. and Brenner, R. C., "Development of two biomass control strategies for extended, stable operation of highly efficient biofilters with high toluene loadings," *Environ. Sci. Technol.*, **30**(5), 1744~1751(1996).
22. APHA/AWWA/APCF, *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 20th ed., American Public Health Association/American Water Works Association/Water Pollution Control Federation, Washington, D.C.(1998).
23. Watts, R. J., *Hazardous wastes: sources, pathways, receptors*, John Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 271~306(1997).
24. Aizpuru, A., Malhautier, L. and Fanlo, J. L., "Quantitative structure-activity relationship modeling of biofiltration removal," *J. Environ. Eng.*, **128**(10), 953~959(2002).
25. Deshusses, M. A. and Johnson, C. T., "Development and validation of a simple protocol to rapidly determine the performance of biofilters for VOC treatment," *Environ. Sci. Technol.*, **34**(3), 461~467(2000).
26. Zhu, X. Q., Suidan, M. T., Pruden, A., Yang, C. P., Alonso, C., Kim, B. J. and Kim, B. R., "Effect of substrate Henry's constant on biofilter performance," *J. Air Waste Manage. Assoc.*, **54**(4), 409~418(2004).
27. Zhu, X., Suidan, M. T., Alonso, C., Yu, T., Kim, B. J. and Kim, B. R., "Biofilm structure and mass transfer in a gas phase trickle-bed biofilter," *Water Sci. Technol.*, **43**(1), 285~293(2001).
28. 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.*, **32**(20), 3118~3123(1998).
29. Shareefdeen, Z. and Baltzis, B. C., "Biofiltration of toluene vapor under steady-state and transient conditions - theory and experimental results," *Chem. Eng. Sci.*, **49**(24A), 4347~4360(1994).
30. Alonso, C., Zhu, X. Q., Suidan, M. T., Kim, B. R. and Kim, B. J., "Parameter estimation in biofilter systems," *Environ. Sci. Technol.*, **34**(11), 2318~2323(2000).
31. Devillers, J., "Ecotoxicity of chemicals to photobacterium phosphoreum," *Handbooks of ecotoxicological data*, Kaiser, K.L.E., and Devillers, J. (Eds.), Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam(1994).