

바이오필터의 공학적 해석

†김인호·최호석

충남대학교 화학공학과, 대전시 유성구 궁동 220, 305-764

(접수 : 2002. 2. 28., 게재승인 : 2002. 4. 10.)

Engineering Analysis of Biofilter

In Ho Kim† and Ho Suk Choi

Department of Chemical Engineering Chungnam National University Daejeon 305-764, Korea

(Received : 2002. 2. 28., Accepted : 2002. 4. 10.)

Biofiltration is a bioprocess treating volatile organic compounds (VOCs) in order to convert the VOCs to harmless products. This review on biofiltration is intended to provide an engineering concept such as removal efficiency, maximum load, elimination capacity and so on. Besides, modeling concept of biofilter is also supplied for designing biofilter system. Quantitative data generated in our research group is shown to explain the engineering concept as well as the modeling idea.

Key Words : VOC, biofilter, analysis

서론

휘발성 유기 화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs)은 비점이 100℃ 이하이고, 25℃에서 증기압이 1 mmHg보다 큰 물질을 말하는 것으로서 메탄과 같은 알칸가스, 메탄올과 같은 알콜류, 벤젠 및 톨루엔과 같은 저분자 탄화수소, 클로르벤젠과 같은 할로젠 방향족 화합물, 트리클로르에탄(TCA) 및 트리클로르에탄(TCE)과 같은 할로젠족 용매 등을 포함한다. 휘발성 유기 화합물은 대기 중에서 이동성이 강하고 냄새를 유발할 뿐만 아니라, 마취성이 강한 오염물질로 알려져 있다. 또한 잠재적인 독성 및 발암성을 가지고 있을 뿐만 아니라 산화질소 및 다른 화학물질과 광화학적으로 반응하여 오존을 형성하기 때문에 이들에 의한 환경오염은 특별한 관심을 집중시키고 있다.

휘발성 유기 화합물은 화학, 제약, 기계, 전자공업에서 제품의 생산 및 세정 등의 공정에서 광범위하게 이용되고 있으며, 대표적인 배출공정으로는 인쇄, magnetic tape 제조, film coating 등을 들 수 있다. 이러한 유기 용매들은 대부분 휘발성을 강하게 지니고 있어 증기형태로 배출되어 대기오염은 물론이고 작업자의 건강에도 큰 영향을 미친다. 그래서 여러 가지 휘발성 유기 화합물들이 새로운 환경 규제 대상에 포함되고 지금까지 규제가 되어왔던 물질들은 그 규제가 더욱 강화될 전망이다. 휘발성유기화합물 배출시설의 종류, 규모 및

억제방지시설 기준 등에 관한 규정을 99.3.31.고시[10개 주요 업종 선정]하였다(1). 따라서 보다 효과적이고 경제적인 휘발성 유기 화합물의 처리기술 개발이 시급한 상태이다.

대부분의 휘발성 유기 화합물 발생원인 폐용제류는 소각과 같은 열에 의한 처리 및 화학적 산화 그리고 매립 등에 의하여 처리되고 있다. 소각 처리시 발생하는 배기가스 내의 휘발성 유기 화합물의 경우에는 흡착 및 산화에 의해 처리하고, 수중에 존재하는 휘발성 유기 화합물의 경우에는 흡착, 탈기(air-stripping), 역삼투 등에 의해 처리하고 있는 실정이다. 그러나 이들 방법은 처리 비용이 고가이며, 특히 저농도의 휘발성 유기 화합물을 함유하고 처리 규모가 클 경우에는 경제적으로 더욱 불리하다. 이에 비하여 휘발성 유기 화합물의 생물학적 처리법은 처리 비용면에서 매우 유리하고 처리 규모가 커짐에 따라 열 및 화학적 산화 공정에 비해 운전 비용이 적게 드는 장점이 있고, 시설비에 있어서도 매우 경제적인 뿐 아니라, 유지 관리비도 유리하여 현재 선진 외국의 경우 이 공정에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다(2). 휘발성 유기 화합물의 생물학적 제거는 반응기에 충전된 담체에 미생물을 부착시켜 처리하는 고정상 생물여과공법(Biofiltration)이 주로 이용되고 있다. 바이오필터는 오염물질을 없애기 위해 흡수(absorption), 흡착(adsorption), 미생물분해(microbial degradation) 공정을 수반한다. 생물학적인 활성을 갖는 필터 층(layer)으로 오염된 공기가 흐르게 됨으로써 처리가 된다(Figure 1). 오염물질은 기체 상에서 퇴비, 이탄재 그리고 유·무기 담체와 같은 고체 입자 표면이나 표면에 고정화되어있는 생물막으로 전달되고 확산되어 생물막내의 미생물에 의하여 생물학적으로 산화된다(3). 바이오필터에서 발생하는 문제점으로는 미생물이 많이 자라서 막히는 현상이

†Corresponding Author : Department of Chemical Engineering
Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea
Tel : +82-42-861-5375, Fax : +82-42-822-8995
E-mail : ihkim@cnu.ac.kr

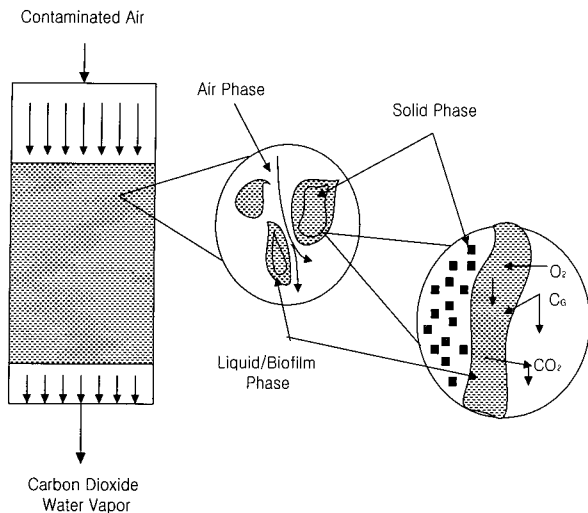


Figure 1. VOC removal mechanism in biofilter.

발생하고, 부적절한 수분 함량 조절로 인하여 제거 속도가 감소되게 되며, 부적당한 pH 조절과 영양분 첨가 방법으로 제거 성능이 감퇴된다(4). 따라서 운전과정에서 발생하는 문제를 최소화하고, 장치를 보다 소형화하거나 설치면적을 줄이는 방면으로의 기술개발이 요구된다. 이러한 목적을 달성하기 위해서는 분해미생물의 배양 최적화, 외부환경변화를 완충해줄 수 있는 새로운 바이오필터 담체의 개발, 그리고 압력손실이 적고 단위면적 당 처리 가스 량을 극대화할 수 있는 새로운 개념의 바이오필터 시스템 개발이 필요하다. 따라서 본 총설에서는 바이오필터 연구에서 고려할 공학적 문제를 토의하고자 한다.

바이오필터의 연구동향

미생물을 이용하여 폐가스를 처리하는 연구는 1950년대에 구미에서 시작되었다. 피트와 흙을 쌓고 이곳에 가스를 통과시켜 처리하는 바이오필터가 1957년에 가동된 이래 1960년대에 기술개발은 크게 진전되지 못하였다. 그러나 1970년대에 들어 공기오염에 대한 규제가 강화되자 독일이나 화란을 중심으로 바이오필터에 대한 연구가 다시 활발하여지고 공기분배에 연구의 초점을 맞추어 새로운 filter media 개발이 진행되었다. 이때 사용된 재질은 bark, peat(5), wood chip 등이다.

1980년대 이후 biofiltration은 유럽에 확산되었고 미국에서 서서히 도입되었다. 이때 컴퓨터로 제어되는 밀폐형 바이오필터가 개발되었다. Media개발의 진전이 있어 무기재질(활성탄, 세라믹, carbon coated polystyrene)의 biofilter media가 개발되었다(6). 바이오필터 기술은 계속 발전하고 있으며 시장규모

가 커감에 따라 개발회사의 수효가 증가하고 있는 형편이다. 기술개발의 방향은 다음과 같다(7):

- 새로운 biofilter design (Roto-Biofilter와 같은 회전식 설계)
- 미생물에 의한 VOCs의 분해경로 연구
- 혼합 VOCs의 처리
- 초기 운전 시작 시의 biofilter의 거동
- VOCs 이외의 미생물 영양분 공급 방법
- Biofilter 내의 미생물 필름의 조절
- Biofilter 공정의 모델링

한편 국내의 연구현황을 보면 구미와 비교하여 약 20년의 지연이 있었다. 1990년대 들어 악취를 제거하기 위해 국공립 연구소를 중심으로 연구가 시작 되었다. 요업기술원, 국립환경연구원, 한국건설기술연구원에서 폐수처리장에서 배출되는 악취가스를 제거하기 위해 바이오필터 연구가 수행되었다.여러가지 media에 대한 기초연구가 수행되었고 연구된 media로 다공성돌, 부식토, 규조토, 갈탄,소나무 껍질 등의 유기, 무기 재료들이 사용되었다. 1990년대 후반에 들어 휘발 유기성분 VOCs에 대한 규제가 예고되어 BTEX(Benzene, Toluene, Etylbenzne, Xylene)를 *Pseudomonas* 균에 의하여 분해하는 바이오필터의 연구가 활발해지고 있다. 근래 연구 발표된 BTEX 처리 biofilter의 연구동향은 Table 1과 같이 정리할 수 있다.

바이오필터 성능 측정인자(Biofilter performance measures)(7)

제거율(Removal efficiency, R.E.)

바이오필터 수행을 묘사하는데 제거율(removal efficiency)이라는 용어를 사용한다.

$$R.E. = 1 - \frac{C_{g.out}}{C_{g.in}} \tag{1}$$

여기서 $C_{g.in}$ 와 $C_{g.out}$ 는 오염물의 입구와 출구 가스 농도이다. 제거율을 공정변수로 표현하면

$$R.E. = 1 - \exp(-\mu_1 \tau) \tag{2}$$

여기서 τ (h)는 바이오필터 내에서의 기상의 평균 체류 시간 이고 오염물 생분성과 관련된 μ_1 은 속도 상수이다. 미생물 분해 속도는 기상의 오염물 농도에 대하여 1차식이다. 생물여과법에 대한 중요한 설계 변수는 생물 분해 속도이다. 물질 전달과 최대 제거 속도 또한 중요한 인자로 고려된다. r 의

Table 1. Recent researches on the biofilter for BTEX removal in Korea

Researchers	Contaminants	Work	References
김인호, 최호석	Toluene	Peat, Bark Synthetic media	(8)
류희욱,조경숙	BTEX	VOC removal Metabolism	(9)
박창호	BTEX	Biofiltration	(10)
장덕진	BTEX	<i>Pseudomonas</i> Growth	(11)
박성훈	TCE	<i>B. cerpacia</i> Growth Study	(12,13)

속도로 오염물을 분해하는 미생물의 반응속도가 1차반응이면,

$$r = \mu_1 C_g \quad (3)$$

(2)식을 유도하기 위해 정상 상태에서 높이에 따른 오염물의 물질 수지를 세우면 다음과 같다.

$$F_g C_g |_z - F_g C_g |_{z+dz} = \mu_1 C_g \epsilon A dz \quad (4)$$

여기서 $F_g(\text{m}^3/\text{h})$ 는 기상 유속, $A(\text{m}^2)$ 는 바이오필터 단면적, ϵ 는 바이오필터 내의 기상이 차지하는 공극이다. 바이오필터 전체 높이 Z 에 대해서 적분을 하면

$$\frac{C_{g,out}}{C_{g,in}} = \exp\left(-\mu_1 \frac{\epsilon AZ}{F_g}\right) = \exp(-\mu_1 \tau) \quad (5)$$

여기서 $\tau = \frac{\epsilon AZ}{F_g}$

부하량(Maximum load, L)

제거율(R.E, removal efficiency)만이 어느 정도의 오염물이 제거되는지를 알 수 있는 척도는 아니다. 예를 들면 10 ppm 암모니아의 기체흐름에서 99%가 제거되는 것과 1000 ppm의 흐름에서 99%가 제거되는 것은 다르다. VOC의 입구 농도가 증가되면 분해 속도는 1차반응에서 0차반응이 된다. 따라서 R.E가 감소하게 되는 부하량 L 이 정의되어야한다. L 이 클 때 바이오필터 높이에 대한 오염물의 물질 수지는 다음과 같다.

$$F_g C_g |_z - F_g C_g |_{z+dz} = \mu_0 \epsilon A dz \quad (7)$$

여기서 $\mu_0(\text{gm}^{-3}\text{h}^{-1})$ 는 0차 생분해 반응속도 상수이다. 변수 분리하여 적분하면

$$L = C_{g,in} - C_{g,out} = \mu_0 \frac{\epsilon AZ}{F_g} = \mu_0 \tau \quad (8)$$

이때 R.E.는 다음 식과 같이 입구 농도에 의존한다.

$$R.E. = 1 - \frac{C_{g,out}}{C_{g,in}} = \frac{\mu_0 \tau}{C_{g,in}} \quad (9)$$

제거량(Elimination Capacity, E.C.)

바이오필터 제거량($\text{g}/\text{m}^3\text{h}$)은 단위 담체부피당 오염물의 제거 속도이다.

$$E.C = \frac{(C_{g,in} - C_{g,out}) \times Q}{V_f} \quad (10)$$

여기서 Q 는 유량, V_f 는 반응기 부피이다.

Thiele number

바이오필터의 효율을 알아보는데 오염물의 제거시에 바이

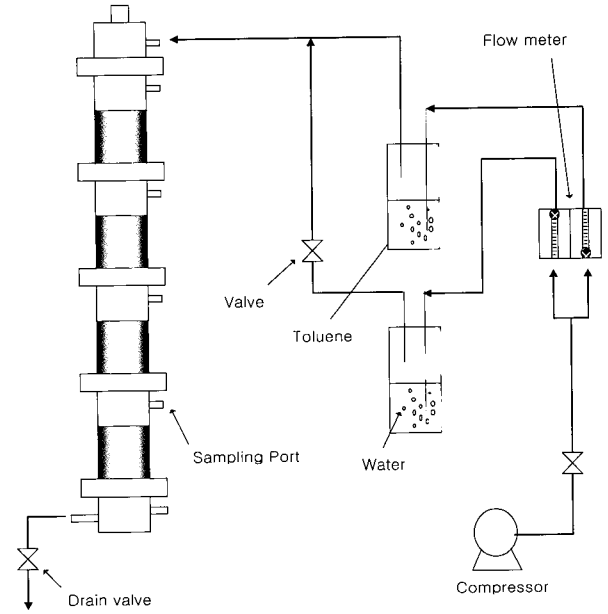


Figure 2. Experimental equipment for biofilter.

오필름 내에서 확산/물질 전달에 대한 생분해속도의 상대적 중요성을 나타내주는 무차원 변수 Thiele number ϕ 를 조사한다. 1차 분해 속도에서 Thiele number는 다음과 같다.

$$\phi = \sqrt{\frac{\mu_1 \delta^2}{D}} \quad (11)$$

여기서 $\delta(\text{m})$ 는 바이오필름의 두께이고 $D(\text{m}^2/\text{h})$ 는 바이오필름에서 오염물의 유효 확산 계수(effective diffusion coefficient)이다. δ 가 증가함에 따라 바이오필름은 확산저항을 받는다. 효율적인 바이오필터의 운전을 위해서는 체류 시간 τ 가 기상으로부터 바이오필름으로 오염물의 물질 전달이 이루어지도록 길어야 한다. 제거량은 분해 속도가 지배적인 0차반응($C_g \gg K$)일 때 부하량이 증가하면서 최대값에 도달된다. 최대값 영역에서 제거율은 증가된 유량 때문에 작아진다. 낮은 농도($C_g \ll K$)에서 분해 속도가 1차반응이면 제거율은 입구 농도에 무관하고 제거량은 농도에 따라 증가한다.

바이오필터 운전 (14)

실험에 사용할 여러 가지 담체(peat+calstone, synthesized media, barks, wood chips)를 바이오필터에 충전하기 전에 각 담체를 oven에서 완전히 건조시킨다. 건조된 담체들은 Autoclave에서 121°C, 1atm 하에서 25분간 멸균하는 방식으로 기존 담체에 존재하는 미생물을 제거한다. 미생물 *Pseudomonas putida*를 배양한 배양액을 각 충전체에 잘 혼합하여 접종한다. 미생물로 접종된 충전체들은 각 바이오필터에 충전한다. 바이오필터의 실험장치 구성은 Figure 2와 같다.

컴프레서로부터 생성되는 공기는 반응기로 유입되기 전에 두개로 나누어지게 된다. 첫 번째 흐름은 반응기내에 적당한 수분을 유지할 수 있도록 습윤기를 통과하여 흐르고, 두 번째 흐름은 원하는 톨루엔 농도를 만들기 위하여 톨루엔이 채

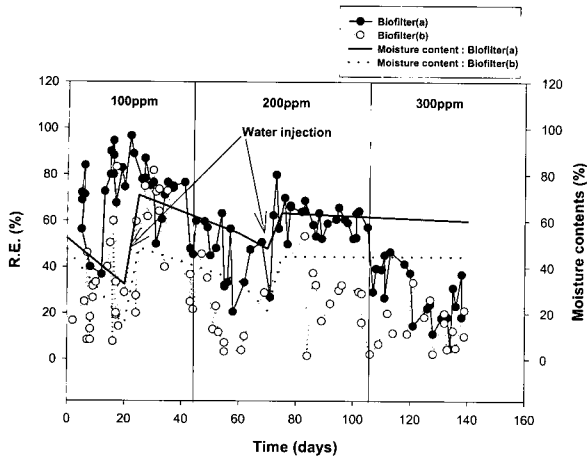


Figure 3. Removal efficiencies and moisture contents in biofilters at 5 l/min.

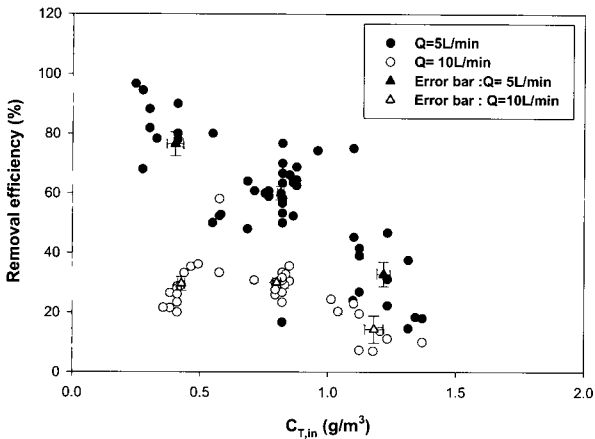


Figure 4. Removal efficiencies of biofilter with respect to inlet concentration of toluene.

Table 2. Design and Operation Parameters

Parameters	Values
height of the packing	108 cm
diameter of column	10.6 cm
gas flow rate	0.3~0.6 m ³ /h
temperature	25~30°C
pressure drop	0~0.543 cm of H ₂ O
toluene concentration	0.411~1.233 g/m ³
humidity of packing material	10~71%

위져 있는 플라스크를 통하여 흐르게 된다. 최종적으로 두 공기흐름은 반응기에 주입되기 전에 완전히 혼합되어 반응기로 유입된다.

실험은 유량 5~10 l/min(0.3~0.6 m³/hr), 가스의 체류시간 1~2 min 그리고 입구 톨루엔 농도범위 0.4~1.2 g/m³에서 190일 이상 운전하였으며, Table 2에 실험조건이 요약 정리 되었다.

제거율 (Removal efficiency)

Figure 3에서 바이오필터의 운전시간에 따른 제거율을 나

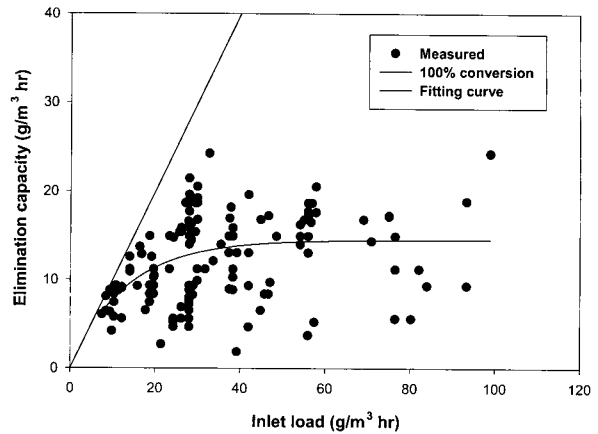


Figure 5. Elimination capacity versus inlet load in biofilter.

타냈다. 초기 운전기간 20일 이전까지 제거율이 20일째 이후의 제거율 보다 낮게 나타났다. 바이오필터의 필터층의 수분 함량이 낮았기 때문이다. 따라서 바이오필터에 수분을 첨가한 후 제거율을 측정한 결과 제거율이 상승하였다.

각 바이오필터의 유입농도에 따른 제거율을 Figure 4로 나타냈다. 유량 5 l/min에서 유입톨루엔 농도 0.81 g/m³ (200 ppm)의 제거율이 유입톨루엔 농도 0.4 g/m³ (100 ppm)에서 보다 낮게 나타나고 매우 불규칙한 형태를 이루는데, 이것은 필터층의 수분이 낮거나, 미생물의 활성이 완전하지 않기 때문에 나타나는 현상이라 사료된다.

제거량(Elimination capacity)

제거량은 오염물의 유입량 및 제거율과 연관되어 있기 때문에 바이오필터 설계시 고려해야 할 중요한 변수이다(5). 바이오필터의 최대 제거량은 충전재에 존재하는 VOC산화 미생물의 활성과 미생물의 밀도에 의존한다. 미생물의 숫자와 활성은 온도, 수분함량, 영양분 그리고 역제기질과 같은 시스템의 운전조건과 밀접하게 연관되어 있다. Biswas에 의해 제거량을 표현할 수 있는 다양한 표현식들이 보고된 바 있다(15).

유입톨루엔량과 제거량 사이의 상관관계 예를 Figure 5에 제시하였다. 유입 톨루엔량이 증가할수록 제거량도 증가하는 영역과 제거량의 증가가 일어나지 않는 포화영역이 존재한다. 이는 앞서 토의한 바와 같이 1차 반응 영역에서 0차 반응영역으로 inlet load가 증가하면서 그래프의 모양이 바뀐다.

바이오 필터 모델링

가장 많이 인용되는 모델로 Ottengraf(16)과 Ottengraf와 Van den Oever(17)이 제시한 모델이 있다. 이 모델은 다음과 같은 간단한 가정을 하고 있다.

- (i) 속도론 : 1차반응(16)과 0차반응(17)으로 속도식을 단순화 하고 있고 산소의 영향을 무시하였다.
- (ii) 생물막 두께를 담체의 직경에 비해 아주 작다고 가정하였다. 바이오 필터 길이 변화에 무관하게 막두께를 일정하다고 정의하였다.
- (iii) 확산이 영양분 공급에서 주요 메커니즘이다.
- (iv) 기체상은 Plug flow이다.

이상의 간단한 가정에서 모델의 해석해를 얻었으며 이 해가 실험치를 해석하는데 자주 인용되었다.

1990년대에 몇 연구진에서 모델링 연구가 발표되었는데 이중 주목할 만한 것은 Shareefdem(18)의 연구이다. 정상상태와 비정상상태에서 탄소원과 산소의 농도에 대해 1차 반응식을 가정하여 모델을 수립하였다. 그리고 Hodge와 Deviny(19)는 linear driving force (LDF)를 계면에서 물질전달을 설명하기 위해 사용하였다. 그들은 생물막과 담체를 하나의 상으로 취급하였다. Amanullah 등(20)은 여러 운전변수의 영향을 고려한 엄밀한 모델을 개발하여 천이 상태와 정상상태의 전환율을 계산하였다. Zarook과 Shaikh(21)은 Ottengraf(17)의 모델을 확장하여 산소의 영향을 고려하고 생물막두께가 biofilter의 길이의 함수라고 가정하여 정상상태의 식을 유도하였다.

본 연구팀의 모델링 연구로 Shareefdem의 모델에 기초하여 정상상태의 문제를 풀었다(22). 모델수립에 필요한 가정은 다음과 같다.

- (i) 등온을 가정
- (ii) 공기흐름의 반경방향 분산은 무시하고 축방향 분산만 고려하였다.
- (iii) 기상과 액상사이에서 VOC는 Hanry의 법칙에 따라 분배된다.
- (iv) VOC와 산소는 생물막 안에서 확산에 의해 이동된다.
- (v) 생물막의 두께는 일정하다.
- (vi) 생물막의 두께는 담체의 크기에 비해 아주 얇다
- (vii) 담체는 생물막에 의해 일부만 덮혀 있고 담체가 노출된 부분에 VOC가 직접 접촉한다.
- (viii) 담체로 VOC가 전달될 때 LDF 모델에 의해 근사적으로 표현된다.

생물막에서 VOC와 산소의 물질수지식은

$$\frac{\partial S_i}{\partial t} = D \frac{\partial^2 S_i}{\partial X^2} - R \tag{12}$$

의 형태로 표현되며 여기서 S는 액상기질농도, t는 시간, X는 생물 막에서 공간좌표, 그리고 R은 생물 반응속도이다. 기상에서 VOC의 물질수지식은

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C_i}{\partial Z^2} - v \frac{\partial C_i}{\partial Z} - \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon} [-aAD \frac{\partial S_i}{\partial X} + (1-a)k(q_i^* - q_i)] \tag{13}$$

의 형태로 수립된다. 여기서 C는 기상기질농도, Z는 탑에서의 공간좌표, ϵ 는 공극율이다.

(12)와 (13)의 형태로 표시되는 여러 편미분 방정식들을 적당한 초기조건과 경계조건들과 함께 수치해석 하였다. 편미분방정식들을 상미분방정식으로 전환하기 위하여 Orthogonal collocation법을 도입하였다. 정상상태의 수치해석 결과와 실험치를 비교한 결과를 Figure 6에 보이고 있다. 톨루엔 농도를 100 - 300 ppm으로 biofilter에 공급했을 때 길이에 따라 톨루엔 농도의 감소를 수치모사한 결과와 biofilter의 비교하여 모델의 타당성을 검토하였다.

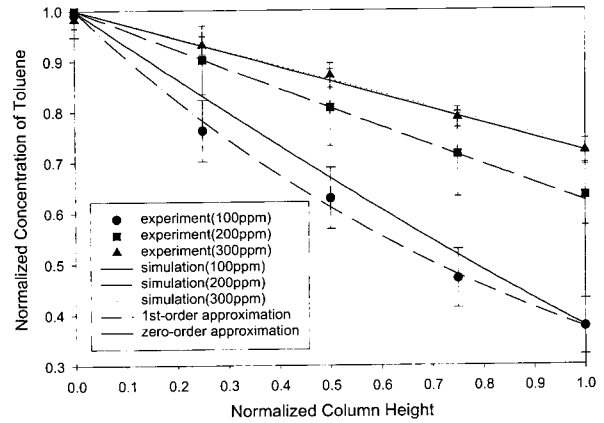


Figure 6. Comparison of experimental data with steady state simulation results.

바이오필터 담체 (Biofilter Media)

바이오매스가 충전물의 공극에 과도하게 축적되면 채널링, 수두손실이 생기고 제거율이 감소한다(23). 이런 막히는 현상은 backwashing를 해주는 방식으로 해결할 수 있다. 이를 위해 해선 강한 충전재를 사용하여야 하고 유동화시키기 때문에 여러 장치가 요구된다. 과도하게 축적된 바이오매스를 산이나 염기성 용액으로 세척하여 제거할 수 있다. 알맞은 수분 조절은 바이오필터 성능에 있어 매우 중요하다. 수분량이 너무 많거나 적어도 제거 성능에 영향을 주게 된다. 너무 많으면 물질 전달 저항이 증가하게 되어 생물막 내로의 휘발성 유기 화합물 전달 속도가 줄어들고, 충전층 내에 혐기성 영역이 생기게 된다. 너무 적으면 미생물의 활성을 감소시킨다. 알맞은 수분량이 실험적으로 각각의 필터 층 물질에 대해 결정된다 하더라도 실제로도 그 적정치를 유지하는 것은 어렵다. 건조는 보통 사용되는 퇴비나 이탄재 같은 담체에 특히 문제시되는데 소수성이고 다시 쉽게 수분을 흡수하여 원래 상태로 되지 못하기 때문이다. 영양분의 농도와 pH조절에도 어려움이 있고 바이오필터 제거 성능에 영향을 끼친다. 또한 암모니아 첨가로 제거 성능의 향상을 보였고 영양분의 첨가는 제거율을 향상시킨다(24).

보통 바이오필터에 사용되는 담체는 퇴비, 이탄재, 흙, 나무껍질, 톱밥 등이다(6). 충전재는 구조, 공극율, 표면적, 흡수성, 경제성 등 기계적, 화학적 물리적, 생물학적 특성을 지니고 있어야 한다. 그러나 많이 사용되는 이탄재나 퇴비 같은 기존의 충전재에서 위에서 서술한 문제점들이 잘 관찰된다. 또한 천연 담체에서는 VOCs 제거에 있어 제거량에 한계를 보여주고 있다(25). 이런 문제점을 줄이기 위해 perlite나 폴리우레탄 폼(foam), 폴리스티렌 비드(beads) 같은 bulking agent와 함께 섞어 사용되었다. 그리고 폴리우레탄 폼을 담체로 직접 사용하기도 하였다. 망상형 폴리우레탄 폼은 높은 공극율과 표면적, 기공 크기, 낮은 밀도, 친수성을 가지고 있다(26).

감 사

본 연구는 과학기술부 연구용역 사업으로 수행되었고 일부 연구비는 초정밀 생물분리연구 사업으로 지원되었으며 이에

감사드립니다.

REFERENCES

1. KEPA Regulation 1997-53 (1997).
2. Lesen, G. and A. M. Winter (1991), Biofilter: an Innovative Air Pollution Control Technology for VOC Emissions, *J. Air Waste Magmt. Assn.* **41**, 1045-1054.
3. Brison, J. F. (1995), Biofilms: Methods for Exzymatic Release of Micro-organisms, CRC Press, New York.
4. William M. M. and R. L. Irvine (2000), Polyurethane foam Medium for Biofiltration I: Characterization, II: Operation and Performance, *J. Envir. Eng. Sep.* 815-832.
5. Sorial G. A., F. L. Smith, M. T. Suidan, P. Biswas, and R. C. Brenner (1997), Performance of Peat Biofilter: Impact of the Empty Bed Residence Time, Temperature and Toluene Loading, *Journal of Hazardous Materials.*, **53**, 19-33
6. Webster. T. S., J. S. Deviny, E. M. Torres, and S. S. Basrai (1997), Microbial Ecosystems in Compost and Granular Activated Carbon Biofilters, *Biotechnol Bioeng.* **53**, 296-303.
7. Deviny J. S., M. A. Deshusses, and T. S. Webster (1999), Biofiltration for Air Pollution Control, Lewis Publishers, New York.
8. Hong, S. D., S. W. Myung, H. S. Choi, and I. H. Kim (2000), Experimental Study on the Biofiltration of Toluene Gas, *Kor. J. Biotech. Bioeng.*, **15**(5). 469-473.
9. Cho, K. S., Y. S. Jon, E. Y. Lee, I. D. Kim, and H. W. Ryu (2001), Identification and Metabolic Pathway of VOC/Odor Degrading Microbes, Spring Symposium of Kor. Soc. Biotech Bioeng, A102.
10. Yoon I. K. and C. H. Park, (2000), Degradation of VOC Mixtures Using a Biofilter System, *Kor. J. Biotech. Bioeng.*, **15**(5) 501-506.
11. Lee S. W., J. M. Lee, and D. J. Jahng (1998), Degradation of BTEX and TCE by *P. putida* F1 and *B. cepacia* C4, *Kor. J. Biotech. Bioeng.*, **13**(5), 561-568.
12. Ye B. D., S. H. Park and E. Y. Lee (2000), Effect of Growth Substrates on Cometary Biodegradation of TCE by *B. cepacia* G4, *Kor. J. Biotech. Bioeng.*, **15**(5) 474-481.
13. Park S. H. and E. Y. Kim (1995), Biodegradation Characteristics of Phenol by *P. putida*, *Theories and Applications of Chem. Eng.*, **1**(2), 507-510.
14. Hong, S. D., H. D. Han, S. W. Myung, H. S. Choi, and I. H. Kim (2001), The Effect of Filter Media on the Biofiltration of Air Contaminated by Toluene, *Kor. J. Biotech. Bioeng.*, **16**, 603-608.
15. Smith F. L., G. A. Sorial, M. T. Suidan, A. W. Breen, and P. Biswas (1996), Development of Two Biomass Control Strategies for Extended, Stable Operation of Highly Efficient Biofilters with High Toluene Loading, *Environ. Sci. Technol.*, **30**, 1744-1751.
16. Ottengraf, S. P. P. (1986), Exhaust Gas Purification, In *Biotechnology, Vol. 8*, H. J. Rehm, and G. Reed, Eds., VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim.
17. Ottengraf, S. P. P. and A. H. C. van den Oever (1983), Kinetics of Organic Compound Removal from Waste Gases with a Biological Filter, *Biotechnol. Bioeng.* **25**(12), 3089-3098.
18. Shareefdeen, Z. and B. C. Baltzis (1994), Biofiltration of Toluene Vapor under Steady State and Transient Conditions: Theory and Experimental Results. *Chem. Eng. Sci.* **49**(24A), 43-47.
19. Hodge, D. S. and J. S. Deviny (1995), Modeling of Removal of Air contaminants by biofiltration, *J. Envir. Eng. Div.* **121**, 21.
20. Amanullah, M., S. Farooq, and S. Viswanathan (1999), Modeling and Simulation of a Biofilter. *Ind. Eng. Chem. Res.* **38**, 2765-2774.
21. Zarook, S. M. and A. A. Shaikh (1997), Analysis and Comparison of Biofilter Models, *Chem. Eng. J.* **65**, 55-61.
22. In Ho Kim and Ho Suk Choi MOST Report Env. 99-5.
23. Morales. M., S. Revah, and R. Auria (1998), Start-up and the Effect of Gaseous Ammonia Additions on a Biofilter for the Elimination of Toluene Vapors, *Biotechnol. Bioeng.* **60**(4), 483-491.
24. Acuna M. E, F. Perez, R. Auria, and S. Revah (1998), Microbiological and Kinetic Aspects of a Biofilter for the Removal of Toluene from Waste Gases, *Biotechnol. Bioeng.* **63**(2), 176-184.
25. Kiared K., B. Fundenberger, R. Brazinski, G. Viel, and M. Heitz (1997), Biofiltration of Air Polluted with Toluene under Steady-state Conditions: Experimental Observations, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **36**, 4719-4725.
26. Ergas, S. J., E. D. Schroeder, and D. P. Chang (1992), Biodegradation Technology for Volatile Organic Compound Removal from Air Streams; Phase I; Performance Verification. California Air Resources Board, Final Report under Contract No. AO, 32-137.