

기체상-생물막 여과 공법의 BTX 제거 공정 해석을 위한 1차원 동적 수치모델 개발 Development of an 1-Dimensional Dynamic Numerical Model for BTX Removal Process Analysis by Gaseous-Biofilm Filtration

김영관 · 최성찬* · 김석구** · 이용석***,†

Yeong-Kwan Kim · Sung-Chan Choi* · Seog-Ku Kim** · Yong-Seok Lee***,†

강원대학교 환경공학과 · *한림대학교 환경생명공학과

한국건설기술연구원 환경·플랜트연구소 · *한림성심대학교 보건환경과

Department of Environmental Engineering, Kangwon National University

*Department of Environmental Science & Biotechnology, Hallym University

**Environmental and Plant Engineering Research Institute,

Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

***Department of Health & Environment, Hallym Polytechnic University

(Received December 7, 2015; Revised December 28, 2015; Accepted December 28, 2015)

Abstract : A biofilm filtration for the removal of gaseous pollutants has been recognized as a process with a complex interaction between the gas flow characteristics and the process operating variables. This study aims to develop an one dimensional dynamic numerical model which can be utilized as a tool for the analysis of biofilm filtration process operated in plug flow mode. Since, in a plug flow system, minor environmental changes in a gaseous unit process cause a drastic change in reaction and the interaction between the pollutants is an influencing factor, plug flow system was generalized in developing the model. For facilitation of the model development, dispersion was simplified based on the principles of material balance. Several reactions such as competition, escalation, and control between the pollutants were included in the model. The applicability of the developed model was evaluated by taking the calibration and verification steps on the experimental data performed for the removal of BTX at both low and high flow concentration. The model demonstrated a correlation coefficient (R^2) greater than 0.79 under all the experimental conditions except for the case of toluene at high flow condition, which suggested that this model could be used for the generalized gaseous biofilm plug flow filtration system. In addition, this model could be a useful tool in analyzing the design parameters and evaluating process efficiency of the experiments with substantial amount of complexity and diversity.

Key Words : Filtration, Numerical Model, Gaseous-Biofilm, BTX, Plug Flow

요약 : 부착성 미생물을 이용하여 기체상 오염물질을 여과 방식으로 처리하는 생물 공정은 기체상의 흐름 특성과 공정 인자간 관련성이 매우 복잡하게 작용하는 특징을 가진다. 본 연구는 기체상 공정의 특성으로 미세한 변화에도 반응이 급변하는 현상과 물질간 반응관계의 중요성을 고려하여 일반화된 plug flow계 반응조의 공정 분석 도구로 활용 가능한 1차원 동적 수치해석 모델을 개발하였다. 개발 모델은 물질수지 원리를 기초하여 확산을 단순화하고 물질간 경쟁, 상승, 억제 반응 등 상호 반응관계를 반영하여 구성이 용이하도록 하였다. 개발 모델의 적용성 평가는 저속과 고속으로 구분된 BTX 제거 실험에 대하여 보정과 검정 절차로 수행되었다. 개발 모델은 고속 조건의 toluene을 제외하고 모든 조건과 항목에서 상관계수(R^2) 0.79 이상에서 실험 결과를 재현하였다. 개발 모델은 연속흐름(plug flow)계로써 기체상-생물막의 일반화된 공정에 적용할 수 있는 것으로 평가되었으며 복잡하고 다양한 공정 실험에서 설계 인자 분석 및 효율 평가에 유용한 도구로 사용될 수 있다.

주제어 : 여과, 수치모델, 기체상-생물막, BTX, 플러그흐름

1. 서론

기체상의 유기 오염물질을 여과 표면의 생물막(biofilm)에 접촉하여 제거하는 기체상-생물막 여과(gaseous-biofilm filtration) 처리 방법은 화학적 처리에 비하여 2차 오염 가능성이 낮고 유지·관리에 유리하여 활용성이 높게 평가된다. ¹⁾ 이 방법은 과거 악취 제거에 많이 사용되었으며 배출단계에서 처리해야 하는 오염 VOCs (volatile organic compounds)의 제거에 적합한 것으로 입증되었다. ²⁻⁴⁾ 이때

여과는 미생물이 안정적으로 정착하고 성장할 수 있는 소재로서 토양, 활성탄 등이 주로 사용되며 표면적, 통기성, 재활용성 등을 고려하여 적절한 모양과 재질의 것을 선택적으로 사용할 수 있다. 정착 미생물로는 세균, 진균류, 방선균류 등 필요에 따라 적절한 종을 선택적으로 적용할 수 있으며 처리 대상 및 효율적 반응 조건에 맞추어 조성하게 된다. 즉, 기체상-생물막 여과 반응조는 공정 제어나 운전 방식에 따라 다양한 구조와 형태로 설계될 수 있다. ⁵⁾ 이렇듯 기체상-생물막 여과 공정은 소재와 구성에서 다양할 수

† Corresponding author E-mail: yslee@hsc.ac.kr Tel: 033-240-9202 Fax: 033-240-9201

있으며 주요 운전 인자는 급변할 수 있는 유입 농도, 온도, 수분 외에도 여재 특성, 미생물 종, 접촉 면적 및 시간 등이 있다. 이들 인자는 상호간에 영향을 주고받는 복잡한 반응 관계를 가질 수 있다.⁶⁾ 특히 기체상-생물막 여과 공정은 기체상의 빠른 이동 특성으로 인해 미세한 인자 변화에도 오염 제거효율이 급변하는 운전 특성을 가진다. 이 공법에서 안정적 운전 인자 분석과 공법 개선을 위한 공정 분석 기술은 더욱 중요한 의미를 가진다.

기체상 오염물질 처리를 위한 생물막 여과 공법의 초기 공정분석 연구에는 0차 혹은 1차 반응에 대하여 Michaelis-Menten 반응식에 기초한 경험적 분석해가 이용되었다.⁷⁾ 그러나 이러한 방법으로는 기체에서 미생물로의 이동 과정, 미생물 반응에 관여하는 복잡한 현상 그리고 반응 조건을 설정하고 분석하는데 한계가 있었으며, 이를 극복하고자 Shareefdeen 등⁸⁾은 준 정상상태(quasi-steady state)와 완전 혼합을 가정하고 메탄올과 산소가 고갈된 조건에서 미생물 성장을 모의할 수 있는 공정분석 모델을 개발하였다. 또한 Deshusses 등⁹⁾은 연속흐름계에 대하여 정상상태 모의가 가능한 수치해석 모델을 개발하였다. 모델은 시간에 따른 변화를 모의할 수 있도록 일정 조건에서 일시적 상태(transient state)의 모의가 가능하다. 이러한 생물막 관련 연구를 검토한 Devinny와 Ramesh¹⁰⁾은 기체상-생물막 공법이 특성상 복잡하고 다양한 공정으로 설계될 수 있으며 이에 사용 가능한 일반화된 공정분석 모델과 관련 연구가 부족함을 제시하기도 하였다. 이후 관련 모델에 관한 연구는 대부분 오염물질 제거를 목적으로 한 처리공정 개발에 초점을 두고 이루어졌다. Gerrard 등¹¹⁾은 친수성 물질의 제거에 Pall ring을 적용한 모델을 개발하였으며, Ranjbar와 Ghaemi¹²⁾는 짧은 체류시간에 대한 VOCs 제거를 모의할 수치해석 모델을 개발하고 민감도 분석 연구를 수행하였다. San-Valero 등¹³⁾은 흐름방향으로의 확산과 액상에서의 반응을 생략하고 친수성 물질의 분해과정을 모의하는 모델을 개발하였다. 이들 모델들은 처리 대상 물질, 체류시간, 여재 종류, 확산, 경쟁반응, 습도, 동시 모의 가능한 물질 수 등에서 제한됨을 시사하고 있어 일반화된 기체상-생물막 여과 공법의 공정분석에는 활용이 여의치 않다.

이에 본 연구에서는 일반화된 기체상-생물막 여과 공법의 공정 분석에 대하여 확산과정을 단순화함으로써 물질간 상호 반응관계 모의 과정에 활용이 용이한 구조의 1차원 동적 수치전산모델을 개발하는 연구를 수행하고 개발된 모델을 연속흐름계에 흔히 사용되는 BTX 제거 공정 실험에 적용을 통해 적용성을 고찰하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 기본 원리

기체상-생물막 여과 공정의 반응조에서 일어나는 기체상 물질량의 변화는 물질의 이송·확산 과정과 미생물에 의한

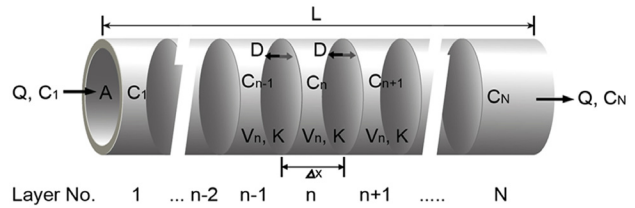


Fig. 1. Conceptual plug flow system with the computational subdivision reactors.

물질의 반응과정으로 구분하여 설명할 수 있다. 이들 과정에 물질수지(mass balance) 원리를 적용하면, 반응조내 축적되는 오염물질의 총량(Acc)은 식 (1)과 같이 유입량(Inp), 유출량(Out), 확산량(Dis) 그리고 반응에 의한 변화량(Rea)의 관계식으로 표현할 수 있다.

$$Acc = Inp - Out \pm Dis \pm Rea \quad (1)$$

기체상-생물막 여과 공정에는 일반적으로 연속흐름(plug flow)계의 반응조가 사용된다. 연속흐름계는 흐름 거리에 따라 다르게 나타나는 농도 상태를 해석하는데 적절하며 하나의 반응조는 여러 개의 부분반응조(subdivision reactor)들이 순차적으로 나열된 구조의 반응조로 개념화할 수 있다(Fig. 1).

연속적으로 나열된 부분반응조에 대해 정류 흐름(laminar flow), 단면 방향 완전혼합, 흐름 방향으로의 확산(longitudinal dispersion) 그리고 물질 변화에 1차 반응을 가정하여 식 (1)에 적용하면 n번째 부분반응조에서의 시간에 따른 물질 축적량 변화는 식 (2)로 계산할 수 있다.

$$V_n \cdot \frac{\Delta C_n}{\Delta t} = -Q \cdot (C_n - C_{n-1}) + A_{G,n} \cdot D \cdot \left[\frac{C_{n-1} - 2 \cdot C_n + C_{n+1}}{\Delta x} \right] \pm K \cdot C_n \cdot V_n \quad (2)$$

식 (2)는 연속흐름계 반응조로서 구성 형태, 운전 방식 그리고 물질 반응관계 등 모의 조건에 따라 다양한 인자를 변수로 포함하는 공정 해석 모델의 지배 방정식으로 사용될 수 있다. 일반적으로 기체상-생물막 여과 공정에 사용되는 반응조는 생물막의 여재를 충전하여 구성된다. 식 (2)를 활용함에 있어 생물막의 면적 반응과정은 여재 비표면적과 생물막 두께로, 여재 충전 상태는 공극율(P)로 각각 반영이 가능하다. 또한 식 (2)에서 1차 반응식으로 표현된 미생물에 의한 물질 변화량 항은 2차 반응이나 경쟁 반응 등 다양한 유형의 반응식으로도 표현할 수 있다. 기체상 물질의 생물막 전달은 일반적으로 Henry의 법칙을 사용하여 표현한다.

2.2. 생물학적 반응 기작

미생물에 의한 물질 반응에는 일반적으로 Monod의 기질-효소 반응식이 사용될 수 있다. 그 중 Michaelis-Menten 식은 단일 물질에 대한 미생물의 반응과 변화를 설명하는데

Table 1. Reaction types and the equations for computation of biological removal rate

Reaction type	Equations	Notice
Simple	$R = \frac{R_{max} \cdot S}{K_s + S}$	Michaelis-Menten
Competition	$R = \frac{R_{max} \cdot S}{K_s \cdot I_c + S}$	
Noncompetitive inhibition	$R = \frac{R_{max} \cdot S}{(K_s + S) \cdot I_c}$	$I_c = 1 + S_i / K_i$
Uncompetitive inhibition	$R = \frac{R_{max} \cdot S}{K_s + S \cdot I_c}$	

적절한 것으로 평가되고 있다. 또한 두 가지 이상의 물질에 대한 미생물 반응은 다양하고 복잡하다. 연구에서는 물질간 반응 유형을 단순(simple) 반응, 경쟁(competition) 반응, 비경쟁 저해(noncompetitive inhibition) 반응, 그리고 무경쟁 저해(uncompetitive inhibition) 반응으로 구분하고 반응 관계 식으로 Table 1을 적용하였다.⁹⁾

2.3. 기체상-생물막 여과 실험

개발 모델의 적용성 평가를 위해 연속흐름계 반응조를 사용하여 기체상 오염 물질을 유입시켜 제거 효율을 분석한 실험 자료를 사용하였다. 실험에 사용된 연속흐름계 반응조는 원형으로 직경 6 cm, 높이 30 cm로 공간체적(bulk volume)은 848 mL로 일반화된 흐름 구조와 운전 방식을 사용하였다(Fig. 2). 반응조 내부에 충전된 여재는 유리재질로 직경 0.6 cm의 구형이 사용되었다. 반응조에서 여재가 충전된 높이는 18.8 cm, 공간 체적은 530 mL이며 충전층의 공극율은 0.44로 계산되었다.

기체상 오염 물질은 BTX가 사용되었으며 반응조에 상향류로 유입시켰다. 제거 효율 분석은 유입부와 유출부에서 시간에 따라 기체상 시료를 채취하고 채취한 시료의 물질 농도

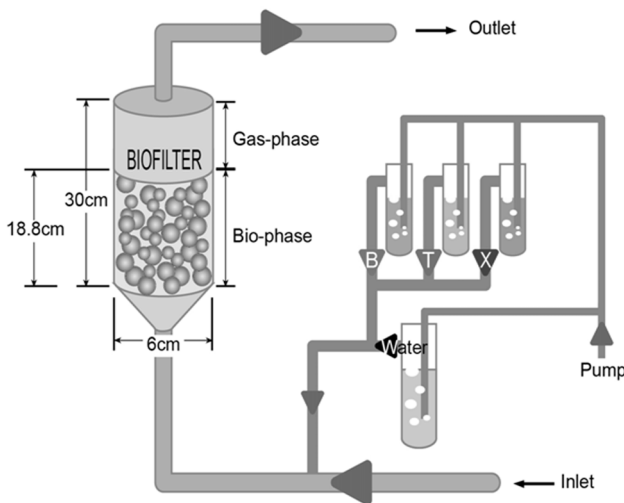


Fig. 2. Schematic diagram of the generalized biofilm filtration plug flow system.

Table 2. Experimental conditions of air flow rate and pollutants concentration

Experimental condition	Air flow rate (L/hr)	Benzene (mg/L)	Toluene (mg/L)	m,p Xylene (mg/L)
Low case	0.026	0.46	2.15	1.03
High case	0.450	2.43	1.96	4.08

를 불꽃이온화 검출기와 0.53 mm (dia), 30 m 길이의 capillary column (HP-1, Hewlett-Packard)이 장착된 가스크로마토그래피(GC)를 이용하여 분석하였다. 분석 조건으로 injector, oven, detector 온도는 각각 150°C, 70°C, 250°C로 설정되었으며 질소 운반가스를 10 mL/min의 조건으로 설정한 상태에서 수행하였다. BTX의 유입 유량과 농도는 가능한 일정하게 유지하도록 하였으며 여재 표면의 생물막은 여재를 충전시킨 반응조에 분해 미생물 현탁액을 주입하여 형성시켰다. 모델의 보정과 검증을 위해서는 유입량과 농도 조건을 달리한 경우에 얻어진 실험 결과를 이용하였으며 두 실험 조건에 대한 유입 유량과 BTX 농도의 평균값을 Table 2에 요약하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 기체상-생물막 여과 모델의 개발

생물막의 여재를 포함하는 연속흐름계 반응조에 대하여 모델의 계산 요소가 되는 부반응조를 중심으로 설계 변수를 개념화하였다(Fig. 3). 계산 요소에서 유입 기체상 물질은 이동 방향으로 공극 사이를 지나 여재 표면의 생물막과 접촉하고 유출된다. 기체상 물질은 공극 중에서 이류와 확산의 빠른 반응이 일어나며 생물막에서 흡착 및 흡수의 상대적으로 느린 분해 반응이 일어난다. 이는 기체상과 생물상 반응에서 관찰되는 일반적인 특징으로써 모델 개발 연구에서는 계산 요소의 변화 과정 해석에 이러한 특징을 반영하고자 모의 대상 매체를 기체상과 생물상으로 구분하였다. 구분된 기체상과 생물상 매체에 물질수지 식을 지배방정식으로 적용하면 각 매체별 오염물질 농도 변화를 기체상에서는 식 (3), 생물상에서는 식 (4)로 표현할 수 있다.

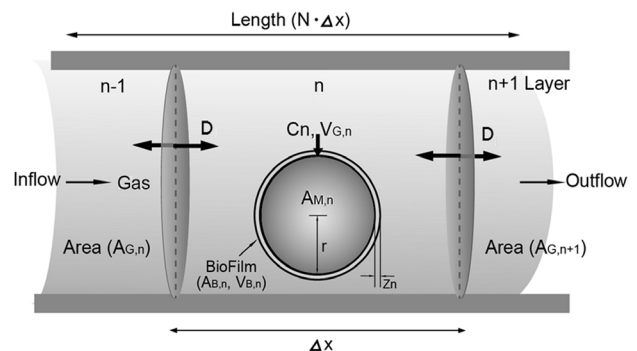


Fig. 3. Diagram of the discretized subdivided reactor.

$$V_{G,n} \cdot \frac{\Delta C_n}{\Delta t} = -Q \cdot (C_n - C_{n-1}) + A_{G,n} \cdot E_{G,n} - A_{G,n+1} \cdot E_{G,n+1} - A_{B,n} \cdot F_{B,n} \quad (3)$$

$$V_{B,n} \cdot \frac{\Delta S_n}{\Delta t} = A_{B,n} \cdot F_{B,n} - R_n \cdot V_{B,n} \cdot S_n \quad (4)$$

기체상에서 n번째 부반응조의 확산량은 전후 부반응조를 고려해야 하며 각각 식 (5)와 식 (6)으로 산출할 수 있으며, 기체상에서 생물막으로의 확산량은 Henry 법칙에 따라 농도 차, 확산계수 그리고 생물막 두께의 관계에 있으며 식 (7)로 표현된다.

$$E_{G,n} = -D \cdot \frac{[C_n - C_{n-1}]}{\Delta x} \quad (5)$$

$$E_{G,n+1} = -D \cdot \frac{[C_{n+1} - C_n]}{\Delta x} \quad (6)$$

$$F_{B,n} = D_L \cdot \frac{[\frac{C_n}{H_c} - S_n]}{Z_n} \quad (7)$$

막을 형성하는 미생물의 체적은 형성된 미생물 층의 두께와 표면적의 관계로써 식 (8)로 가정하였다. 여재가 채워진 부반응조에서 기체의 흐름 속도는 정류 흐름을 가정하고 공극율을 적용하여 식 (9)로 산출하였다.

$$V_{B,n} = Z_n \cdot A_{B,n} \quad (8)$$

$$v_n = P_n \cdot \frac{Q}{A_n} \quad (9)$$

연구에서는 개발 모델에 기체상에서의 농도 변화와 점착 미생물에서의 농도 변화 모의에 적용된 두개의 지배 방정식을 적용하고 수치전산모델을 개발하였다. 개발 모델에는 물질과 생물간 반응 유형에 단순 반응 억제 현상을 포함하며 4가지 경쟁 반응 옵션을 포함하였으며 반응 과정 추가가 용이하도록 확산 과정을 단순화하여 전산화하였다. 계산 방법에는 계산 오차를 줄이고 신속한 계산이 가능한 반복 2차(Iterated 2nd order) Runge-Kutta법을 적용하였다. 개발 모델은 흐름 방향으로 계산 요소가 연속적으로 나열된 1차원 구조를 동적 상태로 모의할 수 있도록 하였다. 모델이 동시에 모의가 가능한 물질은 10종이며 전산처리 용량에 따라 쉽게 수정이 가능하도록 구성하였다.

3.2. 적용성 연구

개발 모델의 적용성 연구에서는 연속흐름계에서 수행된 기체상-생물막 여과 실험 자료를 사용하였다. BTX 제거 실험의 조건을 저속흐름과 고속흐름의 모의 조건으로 구분하고 각각 보정과 검정 조건으로 적용하여 입력하였다. 모의 대상 물질은 Benzene, Toluene 그리고 m,p Xylene이며 연속흐름계 반응조를 총 3개 층으로 구분하여 입력 자료를 구성하였다. 모의 기간은 실험 기간과 동일한 32일로 수행하였다. 모의시 입력 자료로써 유입 BTX 농도는 유입부에서 분석한 실측 농도 값을 사용하였다. 반응조 온도는 20℃, 생물막의 수분 함량은 저속흐름 조건의 실험에서 40%, 고속흐름 조건의 실험에서 30%의 값을 적용하였다. 모의에 적용된 계산시간 간격은 1초 이하로 매체중 거리가 가장 짧은 생물막의 두께를 고려하였다.

모델 보정에서는 저속흐름 조건의 실험 자료를 입력하고 확산계수와 반응계수들을 대상 물질별로 모의 결과를 측정 결과와 비교하고 반복 수정하여 접근시키는 일반적 시행착오 방법을 사용하였다. 모델 보정방법의 특성에 따라 모델 검정에서는 보정 조건과 상이한 고속흐름 조건의 실험 자료를 입력하였으며 보정에서 결정된 확산계수와 반응계수들을 동일하게 적용하고 모의 결과를 측정 결과와 비교하였다. 모델 보정과 검정에 적용된 모의 항목별 확산계수와 반응 상수들의 값은 Table 3과 같다.

보정과 검정 조건에 적용된 개발 모델의 BTX 동적 모의 결과를 실험 결과인 BTX 농도 시변화 자료와 비교하였다(Fig. 4). 개발 모델은 고속흐름 조건의 Toluene과 m,p Xylene에서 실험치에 비하여 다소 높게 모의한 것으로 나타났다. 개발 모델의 모의 수준을 정량적으로 평가하기 위해 모의 농도와 실험 농도간 상관관계를 분석하였으며 결과를 Fig. 5와 Table 4에 요약하였다. 개발 모델은 고속흐름 조건의 Toluene을 제외하고 모든 조건과 항목에서 상관계수(R²) 0.79 이상 수준으로 실험 농도를 모의하였다. 모의 경향에서는 저속흐름조건에서는 Toluene이, 고속흐름 조건에서 m,p Xylene이 다소 높게 모의되었으며 Benzene은 두 모의 조건에서 적절한 수준에서 모의되었다.

모델 보정과 검정 조건에 적용된 개발 모델의 BTX 동적 모의 결과를 실험 결과인 BTX 농도 시변화 자료와 비교하였다(Fig. 4). 개발 모델은 고속흐름 조건의 Toluene과 m,p Xylene에서 실험치에 비하여 다소 높게 모의한 것으로 나타났다. 개발 모델의 모의 수준을 정량적으로 평가하기 위해 모의 농도와 실험 농도간 상관관계를 분석하였으며 결과를 Fig. 5와 Table 4에 요약하였다. 개발 모델은 고속흐름 조건의 Toluene을 제외하고 모든 조건과 항목에서 상관계수(R²) 0.79 이상 수준으로 실험 농도를 모의하였다. 모의 경향에서는 저속흐름조건에서는 Toluene이, 고속흐름 조건에서 m,p Xylene이 다소 높게 모의되었으며 Benzene은 두 모의 조건에서 적절한 수준에서 모의되었다.

Table 3. Reaction coefficients for each substance used for model calibration and verification

Substances	H _c	R _{max}	K _s	D	D _L
Benzene	0,22822	1,6	3,23		
Toluene	0,27686	1,1	6,16	100	40
m,p Xylene	0,21908	1,1	6,04		

Table 4. Results of regression analysis

Simulation conditions	Regression variable	Benzene	Toluene	m,p Xylene
Low case	Slope	0,863	0,693	0,534
	Intercept	0,065	0,447	0,285
	R ²	0,941	0,815	0,791
High case	Slope	1,272	1,646	1,060
	Intercept	-0,424	-0,418	0,917
	R ²	0,942	0,532	0,823

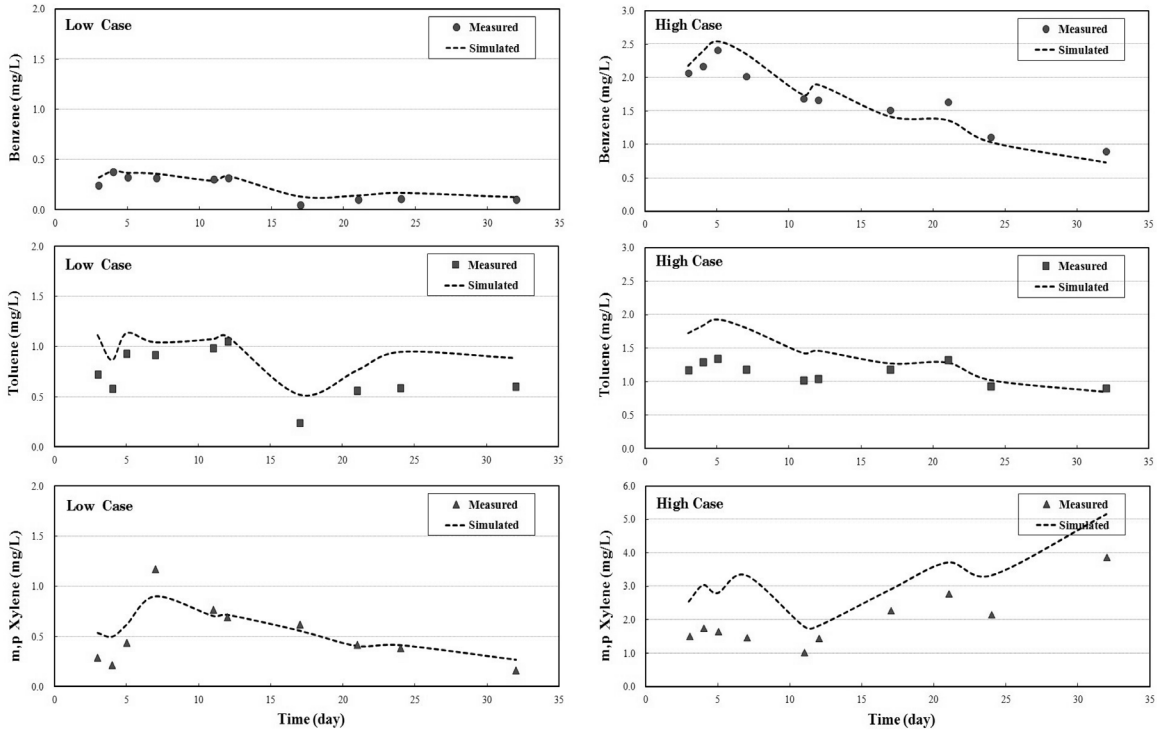


Fig. 4. Comparison of the simulated and measured concentrations during the course of experiment.

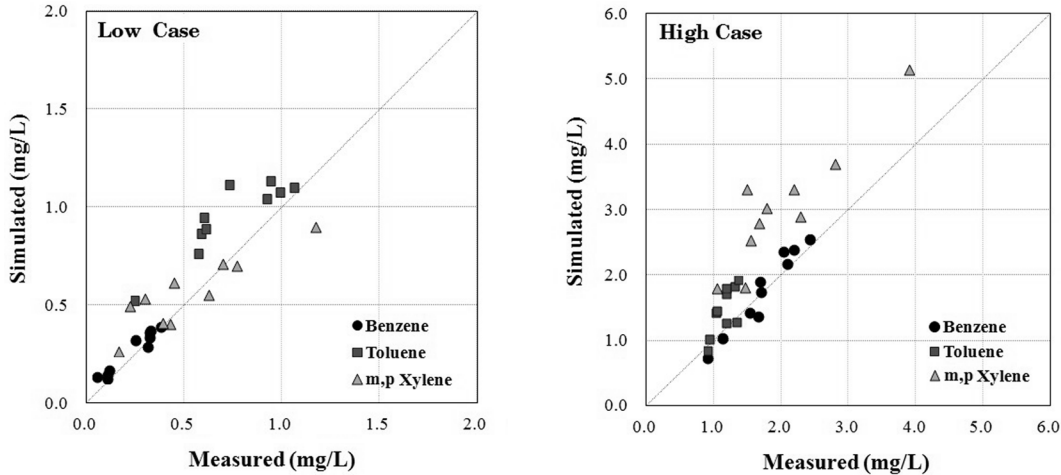


Fig. 5. Graphical comparison of the measured and simulated concentrations.

Table 5. Results of *t*-test

Simulation condition	Confidence interval	Benzene	Toluene	m,p Xylene
Low case	95% Min.	-0,0565	-0,3424	-0,2120
	95% Max.	0,0037	-0,1083	0,1267
High case	95% Min.	-0,2471	-0,5974	-1,4599
	95% Max.	0,1573	-0,0434	-0,6155

또한 개발 모델의 모의 결과가 실험 결과와 동일한 수준인지 여부를 판정하고자 95% 신뢰구간에서 *t* 검정을 적용하여 유의 수준을 평가하였다(Table 5). Benzene의 모의치는 두 실험 조건에 대하여 모두 유의한 것으로 평가되었으며

m,p Xylene의 모의치는 저속흐름 조건에서 유의한 것으로 나타났다. 저속흐름 조건에서 실측치에 비하여 다소 높은 경향으로 모의되었으나 상관계수(R^2) 0.8 수준을 보여준 Toluene과 고속흐름 조건에서 Toluene과 m,p Xylene의 모의 농도는 실험 농도에 대해 유의하지 않은 것으로 평가되었다.

4. 결론

기체상의 오염물질을 생물막에 접촉시켜 제거하는 기체상-생물막 처리 공법은 매우 복잡한 생물·이화학적 과정을 포함한다. 공법의 효율을 분석하고 개선하는데 이용되

는 공정 분석 기술은 이러한 복잡한 공정에서 더욱 중요한 역할을 한다. 기체상-생물막 처리 공법의 공정 분석에서 물질수지 원리는 기체상과 생물상으로 매체를 구분하여 적용하는 것이 적절한 것으로 판단되었다. 저속흐름과 고속흐름 조건의 실험 자료에 의한 모델의 적용성 평가에서 개발 모델은 상이한 실험 조건에 동일한 반응계수를 통해 기체상, 경계면 그리고 생물상에서의 물질 이동 및 변화 과정을 동적으로 모의하고 고속흐름 조건의 Toluene을 제외하고 모든 조건과 항목에서 상관계수(R^2) 0.79 이상 수준으로 실험 농도를 모의함으로써 연속흐름계로서 일반화된 기체상-생물막 여과 공정에서의 적용 가능성을 보여주었다. 일반적으로 실제 실험 장치와 다양한 실험 환경을 모델로 재현할 때 자료가 단순화 되는 과정을 고려하면 연구 결과로부터 개발 모델은 고속흐름에 대한 실험 설계 인자 분석 및 효율 평가에 적용 가능하며 모의 물질에 따라서는 저속흐름공정 분석에도 활용이 가능한 것으로 판단할 수 있다. 특히 개발 모델은 확산 과정을 단순화함으로써 복잡한 물질간 상호반응기작 관계를 쉽게 구성할 수 있다는 장점을 지니고 있어 복잡한 반응 관계를 지닌 기체상-생물막 여과 공법의 개발, 다양한 반응 관계의 공정 인자 분석 및 제거 효율 평가 등 공법 개선과 실용화 연구에 활용과 응용이 용이한 도구가 될 것이라 판단되었다.

Acknowledgement

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업(2015-0123) 연구비 지원과 강원녹색환경지원센터 연구 지원 및 한림성심대학교 교수연구년 협력과정에 의해 수행되었으며, 각 연구 지원 기관에 감사드립니다.

Nomenclature

Z_n : Average biofilm thickness of layer n [L]
 $A_{B,n}$: Biofilm surface area in layer n [L^2]
 $V_{B,n}$: Biofilm volume of layer n [L^3]
 S_i : Competition substance concentration to S [M/L^3]
 I_C : Competition variable to I substance [Dimensionless]
 Δx : Computational distance between subdivision reactors [L]
 C_n : Concentration in layer n [M/L^3]
 A_n : Cross sectional area in layer n [L^2]
 $A_{G,n}$: Cross sectional area of gaseous dispersion in layer n [L^2]
 D_L : Dispersion coefficient in biofilm phase [L^2/T]
 D : Dispersion coefficient in gaseous phase [L^2/T]
 $E_{G,n+1}$: Dispersion flux between layer n and n+1 in gas phase [$M/L^2/T$]

$E_{G,n}$: Dispersion flux between layer n and n-1 in gas phase [$M/L^2/T$]
 $F_{B,n}$: Dispersion into biofilm [$M/L^2/T$]
 $V_{G,n}$: Gas volume of layer n [L^3]
 Q : Gaseous flow rate [L^3/T]
 H_C : Henry coefficient [atm/mole]
 K_i : Inhibition constant of i substance on substance S [M/L^3]
 v_n : Longitudinal gas velocity in layer n [L/T]
 R_{max} : Maximum biodegradation rate of substance [$M/L^3/T$]
 $A_{M,n}$: Media surface area in layer n [L^2]
 K_S : Michaelis-Menten constant of substance [M/L^3]
 n : Number of subdivision layer [integer]
 P_n : Porosity of layer n [Dimensionless]
 K : Reaction rate [$M/L^3/T$]
 R : Removal rate by biodegradation [$M/L^3/T$]
 S : Substance concentration in biofilm phase [M/L^3]
 N : Total number of subdivision layer [integer]
 V_n : Volume of layer n [L^3]

KSEE

References

1. Deshusses, M. A., Hamer, G. and Dunn, I. J., "Behavior of biofilters for waste air biotreatment: 1. Dynamic model development," *Environ. Sci. Technol.*, **29**(4), 1048~1058(1995).
2. Miller, D. E. and Canter, L. W., "Control of aromatic waste air streams by soil bioreactors," *Environ. Prog. Sustain. Energy*, **10**, 300~306(1991).
3. Mallakin, A. and Ward O. P., "Degradation of BTEX compounds in liquid media and in peat biofilters," *J. Ind. Microbiol.*, **16**, 309~318(1996).
4. Oh, Y.-S., Choi, S.-C. and Kim, Y.-K., "Degradation of gaseous BTX by biofiltration with *Phanerochaete chrysosporium*," *J. Microbiol.*, **36**(1), 34~38(1998).
5. Horn, H. and Lackner, S., "Modeling of biofilm systems: a review," *Adv. Biochem. Eng. Biotechnol.*, **146**, 53~76(2014).
6. Kumar, T. P., Rahul, Kumar, M. A. and Chandrajit, B., "Biofiltration of volatile organic compounds (VOCs)-an overview," *Res. J. Chem. Sci.*, **1**(8), 83~92(2011).
7. Hirai, M., Ohtake, M. and Shoda, M., "Removal kinetics of hydrogen sulfide, methanethiol and dimethylsulfide by peat biofilters," *J. Ferment. Bioeng.*, **70**, 334~339(1990).
8. Shareefdeen, Z., Baltzis, B. C., Oh, Y.-S. and Bartha, R., "Biofiltration of methanol vapor," *Biotechnol. Bioeng.*, **5**, 512~524(1993).
9. Deshusses, M. A., Hamer, G. and Dunn, I. J., "Behavior of biofilters for waste air biotreatment: 2. Experimental evaluation of a dynamic model," *Environ. Sci. Technol.*, **29**(4), 1059~1068(1995).

10. Devlinny, J. S. and Ramesh, J., "A phenomenological review of biofilter models," *Chem. Eng. J.*, **113**(2-3), 187~196(2005).
11. Gerrard, A. M., Havranek, J., Novak, V., Halecky, M., Jones, K., Soccol, C. R. and Paca J., "Modelling the steady state and dynamic conditions of a biotrickling filter treating styrene and acetone in air," *Braz. Arch. Biol. Technol.*, **53**(5), 1225~1234(2010).
12. Ranjbar, S. and Ghaemi, A., "Mathematical modeling for volatile organic compounds removal in a biofilter: Model validation and sensitivity analysis," *Iran. J. Chem. Eng.*, **10**(3), 76~87(2013).
13. San-Valero, P., Penya-Roja, J. M., Álvarez-Hornos, F. J., Marzal, P. and Gabaldón, C., "Dynamic mathematical modeling of the removal of hydrophilic VOCs by biotrickling filters," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, **12**(1), 746~766 (2015).