

인공습지 설계를 위한 여재 아세트아미노펜 흡착능 실험

홍진 · 김유현 · 길경익*

서울과학기술대학교 건설시스템공학과

Research on Adsorption Capacity of Acetaminophen for Constructed Wetland Design

Jin Hong · Yuhyeon Kim · Kyungik Gil*

Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Korea

(Received : 08 August 2024, Revised : 13 August 2024, Accepted : 13 August 2024)

요약

산업화로 인해 의약품과 개인위생 용품 (PPCPs)의 잔여물이 생태계로 미량 유입됨에 따라 생태계를 오염시킨다. 특히나 코로나 이후의 아세트아미노펜 검출되는 양의 증가로 인하여 방류수 내로 유입되는 미량 오염물질을 제거하고자 하였다. 인공습지에 적합하다고 판단되는 6가지의 여재를 선정하여 등온흡착 실험을 진행하였다. 아세트아미노펜의 최대 제거율을 산정하기 위해 Langmuir식과 Freundlich식을 사용하였다. 이 중 Freundlich식이 0.9823로 더 높은 결합 값을 나타내었다. 도심 내 인공습지 형성 시 적용하여 습지에서의 아세트아미노펜 저감률을 모델링하고자 하였다.

핵심어 : 등온흡착, 아세트아미노펜, 인공습지, Langmuir, Freundlich

Abstract

Due to industrialization, a trace amount of residues of pharmaceuticals and personal hygiene products (PPCPs) flows into the ecosystem, polluting the ecosystem. In particular, it was intended to remove trace pollutants flowing into the effluent due to the increase in the amount of acetaminophen detected after COVID 19. To conduct this experiment, selected 6 media which are suitable for constructed wetland and isothermal adsorption experiments. Langmuir equation and the Freundlich equation were used to calculate the maximum removal rate of acetaminophen. Among them, the Freundlich equation showed a higher result value of 0.9823. It was applied when forming constructed wetlands in urban areas to model the reduction rate of acetaminophen in wetlands.

Key words : Acetaminophen, adsorption isotherm, constructed wetland, Freundlich, Langmuir

1. 서론

산업의 고도화에 따라 다양한 종류의 화학물질이 환경으로 배출되고 있다. 국내에서 유통되는 화학물질은 약 5,000종 정도이고, 그중 기존 화학물질로 등록되어 있는 것이 43,500여 종이며, 매년 200~400여 종의 화학 물질이 보고되고 있다.(Lee and Park, 2017) 수백 가지의 의약품 물질들이 하수를 통해 방류되며 폐수, 지표수, 식수 등에서 의약품 및 개인위생 용품(Pharmaceuticals and Personal

Care Products, PPCPs)이 검출되고 있다.(Liu and Wong, 2013; Kai *et al.*, 2014; Palmiotto *et al.*, 2018; Radwan *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2021) 코로나 시기를 지나며 PPCPs 중 해열제와 진통제 계열의 의약품에 주로 사용된 아세트아미노펜의 방류를 예측할 수 있다. 하수처리장 방류수에 있어서 이러한 미량유해물질의 배출에 대한 관심이 증대되고 있는데 환경으로 유입되는 방류수 내 미량의 화학물질은 근처 생태계를 오염시켜 어류의 발육 및 성장에 문제를 야기하기 때문이다.

*To whom correspondence should be addressed.

Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology
E-mail : kgil@seoultech.ac.kr

• Jin Hong Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Korea(jinh640@seoultech.ac.kr)
• Yuhyeon Kim Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Korea(18100720@seoultech.ac.kr)
• Kyungik Gil Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Korea(kgil@seoultech.ac.kr)

하수처리장을 방류수 내 여러 미량 유해물질이 존재하며 이 중에서 높은 유출가능성과 잔류성으로 인체에 영향을 미칠 가능성이 높은 12가지의 유해 물질, 아세트아미노펜, 1,7-다이메틸잔틴, 카페인, 카르바마제핀, 시메티딘, 설파메톡사졸, 트리메토프림, Cis-Diltiazem hydrochloride, 설파클로르피리다진, 설파티아조르 설파메타진, 설파디메소신 등이 있다.(Kim *et al.*, 2008) 그 중에서도 아세트아미노펜의 배출이 빈번히 보고되고 있다.

IUCN(International Union for Conservation of Nature and Natural Resources)은 자연을 산림지, 정주지, 하천 및 습지와 같은 공간으로 분류하여 해당 지역의 문제를 인식하고 해결하는 방안으로 자연 기반 해법을 사용하고 있다.

자연 기반 해법(Natural based Solution)은 자연환경 회복을 설계함에 복원을 하려하며 자연환경 회복이라는 관점을 갖고 있다.(Kang and Sohn, 2021) 습지 생태계의 가치 증진 기반 마련과 선진화를 통한 지속가능한 습지 보전의 통합적 관리체계 및 현명한 이용체계 구축에 관한 연구가 진행됨에 따라 탄소축적 극대화를 위해 생태조성을 위해 호소, 기수, 도심, 목논 습지와 같은 다양한 습지에 대해 활발히 연구가 진행되고 있다. 이를 통해 습지 생태계의 가치 증진 기반 마련과 선진화를 통한 지속 가능한 습지 보전의 통합적 관리체계 및 현명한 이용체계 구축을 시도하고자 한다. 본 연구에서는 도심 내 습지에서 미량유해물질 중 하수처리장 방류수에서 상당히 빈번히 검출되는 아세트아미노펜의 제거 가능성을 예비 실험을 통해 확인하고자 하였다.

방류수를 인공습지로 유입함으로써 NbS기법(Natural based Solution)을 통한 제거를 진행하고자 본 연구를 진행하였다.

인공습지 내 사용되는 여재들을 대상으로 실험을 진행하여 PPCPs 중 아세트아미노펜 제거율을 확인하고자 하였다.

2. 연구방법

본 연구에서는 하수방류수를 통해 검출되는 아세트아미노펜은 생태독성 측정함으로 해당 물질이 생태계에 미치는 영향을 완화하고자 실험을 진행하였다. 랩 규모의 실험을 진행함으로 실질적인 하수처리장 유출수 농도보다 높은 농도를 유입시켰다. 본 연구에서 사용한 총 6 종류의 여재를 통하여 해당 의약품물질의 흡착 제거율을 파악하고자 하였다.

2.1 아세트아미노펜 제원

Table 1은 측정 대상 물질인 아세트아미노펜의 특징을 정리한 내용이다.

2.2 여재

굴 패각, 모래, 바이오차, 자갈, 제올라이트(클레이볼), *Castanea crenata* (밤나무) 내피를 사용하여 PPCPs를 흡착

Table 1. Characteristic of acetaminophen

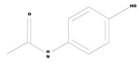
이름	분자구조식	Cas No	화학적식
Acetaminophen		103-90-2	C8H9NO2

Table 2. Characteristic of media used in adsorption isotherm

여재 종류	직경(mm)	공극률(%)	투수계수(m/s)	겉보기 밀도(g/mL)
굴 패각	0.5~2.0	23.31	-	0.68
모래	0.8~1.2	4.58	$2.11 * 10^{-5}$	1.42
바이오차	1.0~5.0	12.83	$7.16 * 10^{-4}$	0.6
자갈	5.0~8.0	10.25	$4.11 * 10^{-2}$	1.44
제올라이트	0.2~2.0	7.04	$3.30 * 10^{-2}$	0.95
<i>Castanea crenata</i>	0.5~2.0	65.92	-	0.60

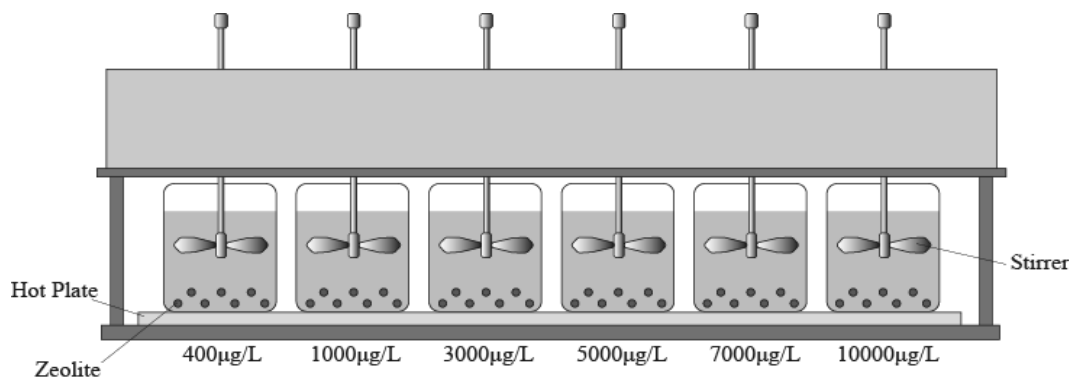


Fig. 1. Schematic diagram of adsorption isotherm

성능을 실험을 진행하였다. 해당 실험을 통하여 6 종류의 여재의 흡착능과 특성을 분석하고자 하였다. 기존 인공습지에 사용되는 여재의 종류 중에서 흡착 성능이 우수한 여과재를 선정하였다. Table 2는 등온흡착식을 진행함에 사용한 여재들의 특성을 정리한 표이다. 각 여재의 겉보기 밀도(Bulk density) 및 입자 밀도(Particle density)는 Blake(1965a; 1965b)의 방법을 사용하였다. (Blake, 1965a; Blake, 1965b)

다음은 등온흡착실험 과정을 서술한 내용이다. 상부면이 개방된 육면체의 1L 아크릴 수조를 사용함으로 여재를 교반하였다. 각 여재의 흡착 성능을 관찰하기 위해 유입되는 아세트아미노펜의 농도 범위를 0.4, 1.0, 3.0, 5.0, 7.0, 10.0mg/L로 진행함으로 농도에 따른 효율을 확인하고자 하였다. 그 외 실험 조건으로는 160rpm으로 모터식 교반기를 운전하였으며, 흡착제의 양은 100g으로 동일하게 진행하였다. 등온흡착실험 모식도는 Fig 1에 나타내었다.

아세트아미노펜이 여재 미세공극에 포화되어 흡착평형이 이루어 진다. 따라서 완전 반응을 위해서는 충분한 접촉시간이 고려되어야 한다.(Cantrell *et al.*, 2003) 반응시간 확보 및 흡착 평형 상태를 관찰하기 위해 1, 3, 6, 12, 18 및 24시간 동안 반응을 진행하였으며 실험 온도는 20°C 내외, pH는 7.0로 인공습지 환경과 유사한 조건에서 실험을 진행하였다.

실험 온도는 20°C 내외, 반응시간은 1, 3, 6, 12, 18 및 24시간 간격으로 pH 7.0의 인공습지와 유사한 조건에서 흡착 평형 상태를 관찰하였다.

2.3 측정방법

용액 중의 아세트아미노펜의 농도는 대한약전 일반시험법 자외가시부흡광도 측정법을 따라 파장 244nm에서의 흡광도 AT 및 AS를 측정하였으며 UV spectrometer (X-ma 1200 Spectrophotometer)를 이용하여 분석하였다.(KFDA, 2012)

실험이 완료된 후 용액 내 잔류하는 아세트아미노펜의 농도 측정을 측정하여 다음과 같이 단위 무게 당 흡착량을 식으로 표현하였다.

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) V}{W}$$

q_e : 흡착평형 상태에서 흡착제 단위 g당 흡착된 흡착질의 양(mg/g)

C_0 : 흡착질의 초기 농도(mg/L)

C_e : 흡착평형 후 용액 중의 흡착질 평형 농도 (mg/L)

V : 용액의 부피(L)

W : 흡착제 투입량(g)

흡착물은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$Removal\ rate(\%) = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100$$

2.4 등온흡착식 선정

등온흡착식은 액상의 흡착질과 일정한 온도에서 평형상태로 흡착제 표면에 흡착된 흡착질 간의 관계를 묘사한다.(Mourabet *et al.*, 2011)

흡착은 화학적 흡착과 물리적 흡착으로 나뉘는데 화학적 흡착의 경우 화학결합의 형성에 이온력과 공유력이 작용함에 유도된다. 화학적 흡착 시 화학적 상호작용으로 인하여 고온에서의 여러 온도 분포의 열이 발생한다. 고온에서 발생하는 화학적 흡착은 단분자층에서만 발생하며 Langmuir 흡착등온선이 대표적인 화학적 흡착등온선이다. Langmuir 흡착등온선은 다음과 같은 명제를 따른다(Langmuir, 1918).

- (1) 에너지 상태는 모든 흡착 지점에서 동일
- (2) 흡착된 분자는 상호작용하지 않음
- (3) 일정 두께 이상 결합 시 흡착 불발

물리적 흡착은 일반적으로 흡착제와 흡착질 사이에 작용하는 약한 반데르발스 힘에 의해 발생하며, 이러한 힘은 모든 물질에서 발생한다.(Margenau, 1939) 물리적 흡착은 흡착열이 화학적 흡착보다 작으며 저온에서 발생한다. 이러한 흡착은 다분자층에서 발생하기에 Freundlich 등온흡착선을 따르며 어떠한 활성화 에너지의 영향을 받지 않기 때문에 빠르게 평형상태에 도달한다.

해당 실험을 통해 흡착 메커니즘을 이해, 습지 내 적용 가능한 방안을 강구하여 PPCPs 흡착에 관한 부족한 기존 연구에서의 보완을 진행하고자 한다. 흡착 메커니즘은 사용하는 필터의 특성과 흡착의 종류(화학적, 물리적)에 따라 나뉜다.

단일 성분 등온흡착식은 5가지로 분류되는데 이를 통해 흡착능, 흡착제의 수명, 흡착장치 거동의 해석과 설계를 파악할 수 있다. 사용하는 흡착제의 단일 성분 흡착 평형량 예측은 유출수 내 대상 물질인 아세트아미노펜의 농도 제어, 흡착 물질 간의 상호작용을 연구함에 있어 중요한 인자로 작용한다. 단일성분 흡착 등온식인 Langmuir 식은 적용 가능한 단일 성분의 흡착 평형으로 2~3개의 매개변수 갖는다. 대표적인 등온식들은 Langmuir식과 Freundlich식이 있으며, Langmuir 등온흡착식의 기본 형태는 다음과 같이 나타낼 수 있다.(KFDA, 2012)

$$q_e = \frac{K_L C_e}{1 + a_L C_e}$$

q_e 는 흡착제의 평형 흡착능(mg/g), C_e 는 평형 상태의 기질 농도(mg/L). q_e , K_L , K_F 및 n 은 주어진 온도에서 주어진 흡착제와 흡착질에 대한 매개변수이다.

Freundlich 등온흡착식은 물리적 흡착의 대표적인 예로 다양한 흡착점과 다층 흡착을 가정하며 다음의 식과 같이 표현할 수 있다.(Freundlich, 1907)

$$q = K C_e^{1/n}$$

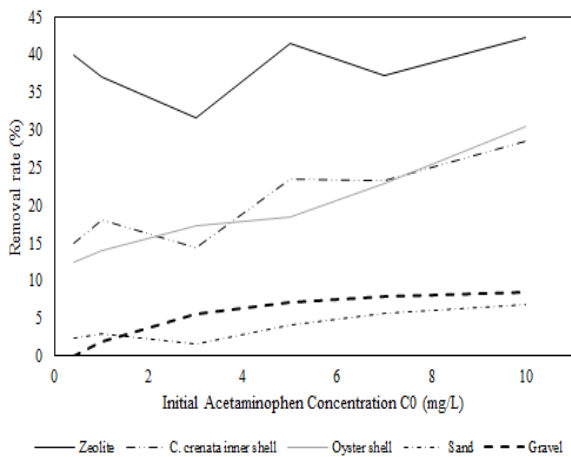


Fig. 2. Early acetaminophen concentration reduction

Freundlich 등온흡착식의 K와 n은 흡착능과 흡착 세기를 나타내는 상수로 $\ln(q_e)$ 와 $\ln(C)$ 사이의 기울기 및 절편을 통하여 산출할 수 있다. 흡착의 호의성 및 흡착제 표면의 불균일도는 $1/n$ 에 적용된다. 물리적 흡착은 일반적으로 흡착제와 흡착질 사이에 작용하는 약한 반데르발스 힘에 의해 발생하며, 이러한 힘은 모든 물질에서 발생한다.(Margenau, 1939) Freundlich 등온흡착선을 따르는 물리적 흡착은 흡착열이 작으며 저온 다분자층에서 발생한다.

Langmuir 등온선 모델은 앞서 주어진 기본식에서 4가지의 서로 다른 형태의 선형식으로 변형될 수 있다. 본 연구에서 해석에 사용된 등온흡착식은 Table 3에 정리하였다.(Ho *et al.*, 2002; Goel *et al.*, 2015)

Langmuir 2 식을 도출하기 위하여 Langmuir 1식의 양변에 Q_0 과 K_L 을 곱하였다. 이후 흡착 평형상태에서의 단위 질량당 흡착량(mg/g)의 역수인 $1/q_e$ 와 평형 상태 기질 농도의 역수인 $1/C_e$ 를 비교하고자 하였다.

Langmuir 3 식의 경우 Langmuir 1식의 양 변에 C_e 를 곱하여 평형 상태 기질 농도를 흡착제의 평형 흡착능으로 나눈 값(C_e/q_e)과 평형 상태 기질 농도(C_e)를 비교하였다.

Langmuir 4 식의 경우 양변에 이론최대흡착용량(Q_0)과 흡착 평형상태에서의 단위질량당 흡착량(q_e)을 곱한 값을 곱한다. $Q_0 = \frac{q_e}{K_L} \frac{Q_0 q_e}{C_e} + q_e$ 다음과 같은 식을 도출하여 평형상태에서의 단위질량당 흡착량(q_e)과 단위 질량당 흡착량을 평형상태의 용질 농도(q_e/C_e)로 나눈 결과값을 비교하였다.

Langmuir 5식은 양변에 이론식의 최대 착용량(Q_0), Langmuir 상수(K_L), 그리고 단위질량당 흡착량(q_e)를 곱하여 흡착량을 평형상태의 용질 농도(C_e)의 역수와 단위 질량당 흡착량(q_e)의 역수를 비교하였다.

q_e 는 흡착제의 평형 흡착능으로 mg/g의 단위를, C_e 는 평형 상태의 기질 농도는 mg/L의 단위를 사용하여 나타낸다. q_e , K_L , K_F 및 n은 주어진 온도에서 실험에 사용된 흡착제 및 흡착질과 관련된 매개변수이다.

3. 결과 및 고찰

Fig 2의 경우 아세트아미노펜의 초기 저감 농도에 관한 그래프이다. 해당 그래프의 경우 자갈의 초기 아세트아미노펜 제거율이 가장 낮으나 점차 상승하여 모래의 제거율보다 증가하는 추세를 확인할 수 있다. 굴 패각은 꾸준히 제거율이 상승하는 반면 *Castanea crenata*과 제올라이트의 경우 주기적으로 흔들리는 추세를 보이나 전반적으로는 증가하는 경향을 보인다. 또한 Fig 2에서는 본 실험에서 사용한 여재 중 제올라이트가 아세트아미노펜의 흡착률이 가장 높음을 확인할 수 있었다.

3.1 여재별 흡착농도 측정 결과

Fig 3~8은 앞의 Langmuir 식을 통하여 나타난 흡착 결과로 랩 규모의 실험을 아세트아미노펜 제거율 실험에 사용한 여재들의 시간에 따른 농도 저감 그래프이다. 해당 그래프는 *Castanea crenata*, 자갈, 굴패각, 모래와 제올라이트를 사용하였다. 아세트아미노펜 초기 저감 단계에서 제올라

Table 3. Process of calculating the Langmuir isothermal adsorption

참고문헌	흡착식	선형식	비례식	매개 변수
Ho <i>et al.</i> , 2002	Langmuir 1	$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{K_L Q_0} \frac{1}{C_e} + \frac{1}{Q_0}$	$1/q_e$ VS $1/C_e$	q_m, K_L
	Langmuir 2	$\frac{1}{C_e} = K_L Q_0 \frac{1}{q_e} - K_L$	$1/C_e$ VS $1/q_e$	
	Langmuir 3	$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{Q_0} C_e + \frac{1}{Q_0 K_L}$	C_e/q_e VS C_e	
	Langmuir 4	$q_e = -\frac{1}{K_L} \frac{q_e}{C_e} + Q_0$	q_e VS q_e/C_e	
	Langmuir 5	$\frac{q_e}{C_e} = -K_L q_e + K_L Q_0$	q_e/C_e VS q_e	
Goel <i>et al.</i> , 2015	Freundlich	$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_e$	$\ln q_e$ VS $\ln C_e$	n, K_F

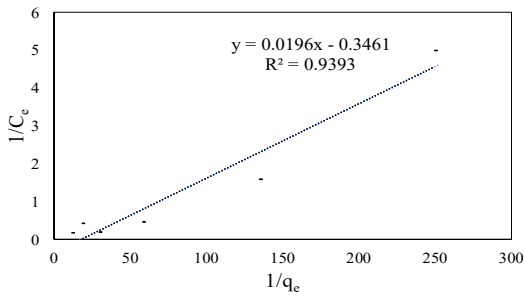
이트(클레이블)에서 가장 높은 제거율을 보여줄 뿐만 아니라 이후 시간이 경과함에 따라 다른 여재들과는 상이하게 가장 높은 저감효율을 보여주고 있다. 반면 초기 단계에서 가장 낮은 흡착률은 보여준 것은 자갈이었으나 시간이 지남에 따라 증가하는 추세를 띠는 반면, 모래의 경우 자갈에 비해 초기 저감율은 높은 편이나 시간이 경과함에 모래는

자갈보다 저효율을 보여준다.

3.2 등온흡착식 평가 결과

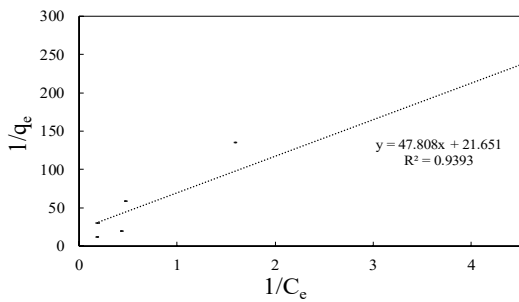
Table 4.에서부터 Table 9.는 Langmuir와 Freundlich 식을 통하여 여재 별 흡착농도 측정 결과를 산정함에 따라 해당 실험에 적절한 식을 찾고자 하였다.

Table 4. Langmuir 1 parameters and calculated values



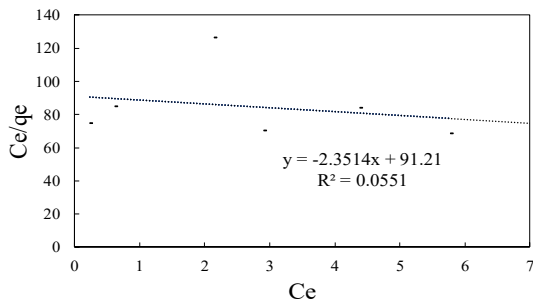
매개 변수	계산값
Q_0	-155.2659
K_L	-0.02525
R_L	0.5025~0.5721
r^2	0.9393

Table 5. Langmuir 2 parameters and calculated values



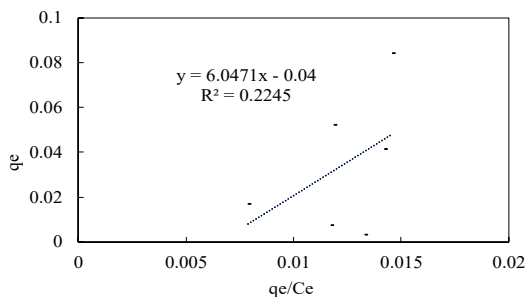
매개 변수	계산값
Q_0	28.7356
K_L	0.1471
R_L	0.2881~0.4857
r^2	0.9393

Table 6. Langmuir 3 parameters and calculated values



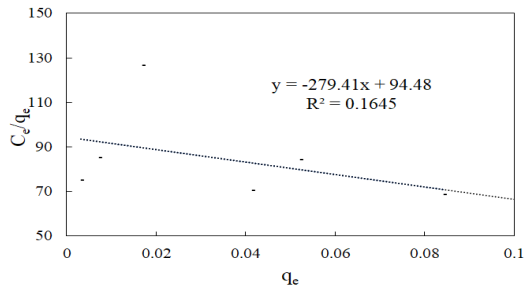
매개 변수	계산값
Q_0	21.3675
K_L	0.1824
R_L	0.2615~0.4582
r^2	0.0551

Table 7. Langmuir 4 parameters and calculated values



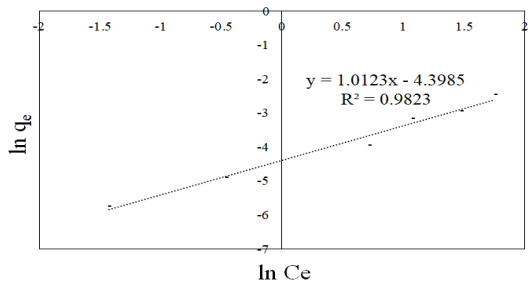
매개 변수	계산값
Q_0	94.48
K_L	-0.7469
R_L	-4.1546~0.7980
r^2	0.2245

Table 8. Langmuir 5 parameters and calculated values



매개 변수	계산값
Q_0	-20.6667
K_L	-0.0135
R_L	0.5014~0.5362
r^2	0.1645

Table 9. Freundlich equation parameters and calculated values



매개 변수	계산값
K_F	3.1193
n	1.2816
r^2	0.9823

Langmuir 등온흡착식은 무차원 상수 분리 계수인 R_L 을 이용하여 등온선의 형상이 흡착에 적합 여부를 판단 할 수 있다. $R_L > 1$ 은 부적합, $R_L = 1$ 은 선형, $R_L = 0$ 은 비가역, $0 < R_L < 1$ 이 적합한 것으로 알려져 있다.(Mahmoudi *et al.*, 2015) 무차원 분리 계수 R_L 의 방정식은 아래와 같다.

$$R_L = \frac{1}{1 + (1 + K_L C_0)}$$

Langmuir 등온식에서 무차원 분리계수와 상관계수(r^2)는 Langmuir 1과 2에서 가장 높았으며, 양쪽 모두 0.9393이었다. Langmuir 곡선의 R_L 값은 모두 0과 1 사이이므로 이러한 흡착과정은 Langmuir 1과 Langmuir 2에 가장 적합한 것으로 나타났다.

Freundlich 상수(K_F)는 여재의 흡착 능력을 나타낸 것으로, 크기가 클수록 흡착 능력이 우수하다는 것을 의미한다. 'n'은 흡착력의 크기를 나타내며, 일반적으로 n이 2 이상일 때 흡착이 쉽게 일어나며, n이 1 이하인 물질은 비흡착성을 띤다.(Hamdaoui and Naffrechoux, 2007)

Freundlich 흡착식의 상관계수(r^2)가 0.9823로 Langmuir 흡착등온식과 Freundlich식 중 Freundlich식이 흡착모델에 가장 적합함을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 실험에서는 자연으로 흘러 들어가는 미량 화학물질을 저감하기 위한 인공습지의 기본 설계 인자로 사용하기 위한 결괏값을 확보하기 위한 등온 흡착 실험 연구를 진행하였다.

▷흡착모델링을 인공습지에 사용, 친환경 여재 총 6종 실험을 진행하여 여재 별 흡착물을 실험하였다. *Castanea crenata*, 굴 패각, 모래, 바이오차, 자갈, 제올라이트(클레이볼), 모래를 이용하여 실험을 진행하였다. 해당 여재 중 가장 높은 저감율을 보여 준 것은 제올라이트(클레이볼)로 42.2%의 아세트아미노펜 저감률을 볼 수 있었다.

▷본 실험을 Langmuir와 Freundlich 흡착식 비교를 통하여 여재 별 아세트아미노펜의 저감률을 산정하였으며 이 중에서 가장 높은 값을 찾고자 하였다. 이 과정에서 Langmuir 식을 여러 선형식으로 유도하였다. Freundlich 흡착식이 Langmuir 흡착식에 비해 가장 높은 상관계수(r^2) 값인 0.9823로 선정됨에 따라 가장 적합하다고 판단하였다.

▷본 연구를 통하여 인공습지를 도심에 설계함에 Freundlich 흡착식을 통한 결과값을 인공습지 내 토양 텃파기를 위한 설계 시 토양 대신 본 실험에서 사용한 여재들을 사용함으로 인공습지의 아세트아미노펜 저감 효율을 증가시키고자 하였다. 해당 결과값을 통하여 도심 내 인공습지 조성 시 습지가 지닌 아세트아미노펜 저감 효율을 모델링하여 판단 할 수 있다.

도심에 위치하게 될 인공습지의 경우, 해당 실험을 통하여 설계 시 습지의 바닥면을 아세트아미노펜의 흡착률이 높은 제올라이트를 포설함으로 인공습지 조성 시 흘러들어오는 유입수 내의 미량 오염물질을 제거하고자 한다.

사 사

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 습지생태계 가치평가 및 탄소흡수 가치증진 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(2022003630005).

References

- Blake, G.R.,(1965a). "Bulk Density". Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical properties. American Society of Agronomy, Inc., Madison, WI, pp. 374–390
- Blake, G.R. (1965b). "Particle Density". Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Properties". American Society of Agronomy, Inc., Madison, WI, pp. 371–37
- Cantrell, KJ, Serne, RJ, Last GV(2003). Applicability of the Linear Sorption Isotherm Model to Represent Contaminant Transport Processes in Site-Wide Performance Assessments. Pacific Northwest National Laboratory. Technical report PNNL-14576. 2003. p.1–6.
- Freundlich, H. (1907). "Über die adsorption in Lösungen. Zeitschrift für physikalische Chemie", 57(1), pp. 385–470.
- Goel, S., Palmkvist, M., Moll, K., Joannin, N., Lara, P., R Akhouri, R., and Wahlgren, M. (2015). RIFINs are adhesins implicated in severe Plasmodium falciparum malaria. Nature medicine, 21(4), pp 314–317.
- Hamdaoui, O., and Naffrechoux, E. (2007). Modeling of adsorption isotherms of phenol and chlorophenols onto granular activated carbon: Part II. Models with more than two parameters. J. of hazardous materials, 147(1–2), pp 401–411.
- Ho, Y. S., Huang, C. T., and Huang, H. W. (2002). Equilibrium sorption isotherm for metal ions on tree fern. Process Biochemistry, 37(12), pp 1421–1430.
- Kai, H. E., Yonetani, T., Takabe, Y., Rahmawati, S., Echigo, S., and Itoh, S. (2014). "Removals of Pharmaceuticals and Personal Care Products in Reclaimed Water during Soil Aquifer Treatment with Different Soil Types, Hydraulic Retention Time, and Saturated Condition," in The International Slow Sand and Alternative Biological Filtration Conference (IEEE).
- Kang, M., J. and Sohn, S. J. Nature-based Solutions from the Perspective of R&I. STEPI Insight, 281(0), 1–50. [Korean Literature]
- Kim, J. H., Park, C. K., Kim, M. Y., and Ahn, S. G.(2008) Analysis of Pharmaceutical Residues on Aquatic Environment using LC/MS. J. of the Korean Society for Environmental Analysis 11(2), pp 99~108 [Korean Literature]
- Korea Food & Drug Administration. (KFDA) (2012), "The Korean Pharmacopoeia 10th edition." The KFDA Notification No. 2012-129
- Langmuir, I. (1918). The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. Journal of the American Chemical society, 40(9), 1361–1403.
- Lee, HY and Park, SA (2017). A Comparative Study on Major Issues in the Chemical Substance Management Act of EU, USA and Japan. J of Law and Politics research. 17(4), pp. 31–65 [Korean Literature]
[DOI <http://dx.doi.org/10.17926/kaolp.2017.17.4.31>]
- Liu, J. L., and Wong, M. H. (2013). "Pharmaceuticals and personal care products (PPCPs): a review on environmental contamination in China". Environment international, 59, pp 208–224.
- Li, L., Zhao, X., Liu, D., Song, K., Liu, Q., and He, Y. (2021). Occurrence and ecological risk assessment of PPCPs in typical inflow rivers of Taihu lake, China. J. of Environmental Management, 285, p 112176.
- Mahmoudi, K., Hosni, K., Hamdi, N., Srasra, E., 2015. Kinetics and Equilibrium Studies on Removal of Methylene Blue and Methyl Orange by Adsorption onto Activated Carbon Prepared from Date Pits—A Comparative Study, Korean J. of Chemical Engineering 32, p. 274.
- Margenau, H., 1939. Van Der Waals Forces, Reviews of Modern Physics 11, p. 1.
- Mourabet, M., El Boujaady, H., El Rhilassi, A., Ramdane, H., Bennani-Ziatni, M., El Hamri, R., and Taitai, A. (2011). Defluoridation of water using Brushite: Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies. Desalination, 278(1–3), pp 1–9.
- Palmiotto, M., Castiglioni, S., Zuccato, E., Manenti, A., Riva, F., and Davoli, E. (2018). "Personal Care Products in Surface, Ground and Wastewater of a Complex Aquifer System, a Potential Planning Tool for contemporary urban settings." J. of environmental management 214, pp. 76–85.
- Radwan, E. K., Ibrahim, M. B. M., Adel, A., and Farouk, M. (2020). The Occurrence and Risk Assessment of Phenolic Endocrine-Disrupting Chemicals in Egypt's Drinking and Source Water. Environ. Sci. Pollut. Res. 27 (2), pp 1776~1788.