

탄화수소 흡착 컬럼의 전산모사 특성

유경선*, 이수정, 김지은
광운대학교 환경공학과

Computational Simulation of Hydrocarbon Adsorption in a Packed Column

Kyung-Seun Yoo*, Su-Jung Lee, Ji-Eun Kim
Department of Environmental Engineering, Kwangwoon University

요약 세탁시설에서 배출되는 탄화수소의 흡착제거 특성을 고찰하기 위하여 흡착 컬럼의 전산모사를 수행하였다. 흡착 질은 세탁시설에서 배출되는 휘발성유기화합물 중 가장 대표적인 탄화수소를 선정하였으며 흡착제는 활성탄으로 전산모사를 수행하였다. 흡착컬럼의 수학적 방정식은 연속방정식과 Navier-Stokes 식을 적용하여 해석하였으며 Matlab 프로그램을 이용하여 미분방정식을 해석하였다. 흡착등온식은 선형흡착등온식, 프로인들리히 흡착등온식 그리고 랑뮈어 흡착등온식을 평가하였으며 흡착등온식의 흡착상수에 따른 흡착량을 비교하였다. 공극률은 0.79, 분산계수는 42.4 cm²/min, 흡착제 밀도는 485 g/L, 흡착컬럼 직경은 2.0 cm, 흡착컬럼 길이는 2.5 cm라는 조건에서 전산모사를 수행하였다. 랑뮈어 흡착등온식에서 선속도, 분산계수, 공극률에 대한 흡착량의 영향을 비교하였다. 선속도는 50~200 cm/min, 분산계수는 100 ~400 cm²/min, 공극률은 0.66~0.79로 변화시켜 수행하였다. 전산모사를 통한 결과는 활성탄-벤젠의 흡착에 대하여 랑뮈어 흡착등온식이 가장 잘 일치하였다. 동일한 조건에서 3가지의 흡착등온식을 비교한 후 전산모사를 통하여 탄화수소의 효율적인 흡착조건을 찾을 수 있으며 이를 고찰할 수 있다.

Abstract Computational simulations of adsorption columns were carried out to investigate the removal characteristics of VOCs from a laundry shop. n-Decane was selected as the representative component among the VOCs emitted, and the activity of the adsorbents, such as activated carbon, was evaluated using commercial CFD code. The mathematical framework was composed of continuity and Navier-stokes equations, and the simulation was performed using the Matlab program. The adsorption isotherms of LDF, Freundlich, and Langmuir were evaluated, and the adsorption amount of the adsorption isotherms with the adsorption parameter was compared. The simulation was carried out using a particle porosity, dispersion coefficient, particle density, bed diameter, and bed length of 0.79, 42.4 cm²/min, 485 g/L, 2.0 cm, and 2.5 cm, respectively. The effect of the gas velocity, dispersion coefficient, and voidage on the adsorption amount was compared in the Langmuir adsorption isotherm. The simulation was carried out in the velocity range of 50 to 200 cm/min, dispersion coefficient range of 100 to 400 cm²/min, and particle porosity range of 0.66 to 0.79. The simulation results of activated carbon with benzene coincided with the Langmuir isotherm. Three types of adsorption isotherm were compared under similar conditions, and the simulation results showed the efficient adsorption condition for hydrocarbons.

Keywords : Adsorption Isotherm, Computational Simulation, Activated Carbon, Benzene, Dispersion

이 논문은 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 기후변화대응기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (2017M1A2A2086647).

*Corresponding Author : Kyung-Seun Yoo(Kwangwoon Univ.)

email: yooks@kw.ac.kr

Received November 5, 2019

Revised December 3, 2019

Accepted March 6, 2020

Published March 31, 2020

1. 서론

지역의 오존농도 변화가 탄화수소나 질소산화물 농도 변화에 의존하는 경우를 각각 탄화수소 결정단계(VOCs limited) 또는 질소산화물 결정단계(NOx limited)로 구분한다.

국내 도심지의 경우 휘발성유기화합물 배출에 의한 오존생성 영향이 높은 탄화수소 결정단계로 알려져 있으나 일부 지역은 질소산화물 결정단계인 것으로도 파악되어 두 가지 영향이 혼재된 것으로 보고된 바 있다[1].

국가 오염물질 배출량 통계자료에 의하면 2015년 국내 휘발성유기화합물의 배출량은 101만 톤이며 유기용제 사용이 55만 톤을 차지하였다. 유기용제 사용은 도장 시설, 기타 유기용제 사용시설, 세탁시설, 인쇄시설 등의 순으로 배출기여도가 감소하지만 도심지역의 경우 세탁시설의 기여도가 증가하였다. 전국 기준으로 세탁시설의 배출기여도는 전체 배출량의 4 % 수준인 2만 톤이나 서울만을 살펴보면 서울시 배출량 5만 톤을 기준하여 세탁시설의 배출량은 4,000 톤 규모로 8 % 수준으로 증가한다[2].

세탁시설의 유기화합물 배출은 드라이크리닝 과정에서 발생하며 사용된 용제 대부분이 대기 중으로 배출된다. 드라이크리닝 용제는 노말파라핀, 이소파라핀 그리고 방향족으로 구성된 수 백 여종의 화학물질 혼합물로 대부분 C8~C12 사이에 분포하였으며 n-nonane, n-decane, n-undecane 등이 주성분이었다.

본 연구에서는 이러한 세탁시설에서 배출되는 휘발성 유기화합물의 흡착특성을 평가하기 위하여 흡착모형을 구축하고 주요 성분들의 혼합물에 대한 흡착특성 전산모사를 수행하였다. 대상물질의 선정은 세탁소 유기용제 내에 다량으로 존재하는 성분과 POCP(Photochemical Ozone Crearion Potential) 값이 높은 성분들을 고려하여 황성탄-벤젠을 선정하였다[3-5].

2. 본론

2.1 다성분 흡착속도론

2.1.1 Mathematical Formulation

흡착탑에 대한 지배방정식은 유체의 흐름방향인 Z방향에 대하여 아래의 Eq. (1)과 같이 정리된다.

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} - V_x \frac{\partial C_A}{\partial x} - \rho_p \left(\frac{1-\epsilon}{\epsilon} \right) \frac{\partial q}{\partial t} \quad (1)$$

흡착탑의 초기조건은 t=0에서의 모든 위치에서 $C_A=0$ 으로 정의될 수 있으며 Eq. (2)와 같이 정리되고 경계조건은 Eq. (3)과 같이 정의된다.

$$C_A = 0 \quad 0 < x < L, \quad t = 0 \quad (2)$$

$$C_A = C_{A0} \quad x = 0, \quad t = t \quad (3)$$

흡착등온식이란 일정한 온도에서 흡착을 진행하여 평형을 이루었을 때 흡착제에 대한 흡착질의 흡착량과 유체 중의 흡착질에 대한 농도와의 관계를 나타낸 식으로, 흡착제의 성능을 알아보기나 흡착제에 대한 여러 종류의 흡착질 효율을 비교하기 위해 사용한다. 아래의 Table 1은 흡착모사에 사용된 매개변수의 단위와 범위를 정리하였다[6-10].

Table 1. Parameters on Modeling

Parameter	Symbol	Unit	Value
Particle Porosity	ϵ	-	0.79
Dispersion Coefficient	D_b	cm ² /min	42.4
Superficial Velocity	V_x	cm/min	25~50
Particle Density	ρ	g/L	485
Langmuir Constant, alpha	a	L/g	0.88
Langmuir Constant, beta	b	mg/g	45.4
Bed Diameter	D	cm	2.0
Bed Length	L	cm	2.5
Particle Diameter	d_p	mm	3.51
Particle Specific Surface Area	-	m ² /g	804.59
Particle Pore Volume	-	cm ³ /g	0.4734

흡착탑의 축방향분산계수(axial dispersion coefficient)는 Chung and Wen 식을 이용하여 Eq. (4)와 같이 추정하였다.

$$D_b = \frac{2R_p U_o}{0.2 + 0.011 Re^{0.48}} \quad (4)$$

흡착탑해석에 있어 중요한 요소 중의 하나는 흡착등온식으로 본 연구에서는 흡착반응의 해석에 일반적으로 사용되는 선형흡착등온식, 랑뮈어 흡착등온식, 그리고 프로인들리히 흡착등온식을 적용하였다.

선형흡착등온식(LDF: Linear Driving Force)은 아래의 Eq. (5)과 같이 정리되며 흡착량은 농도와 흡착상수에 비례하는 것으로 정의하며 일반적으로 농도가 낮은 경우 잘 맞는 것으로 알려져 있다.

$$q = K_d C_A \quad (5)$$

여기서 q 는 흡착제 단위 질량당 흡착된 흡착질의 양(mg/g)이고 C_A 는 흡착질의 평형 농도(mg/L)를 의미하며 K_d 는 선형흡착상수이다.

랑뮈어 흡착등온식은 흡착제 표면에서 흡착질이 단층으로 흡착하고 흡착질 사이의 상호작용이 없다는 것을 가정으로 유도하며 아래의 Eq. (6)과 같이 정리된다.

$$q = \frac{K_B C_A}{1 + K_A C_A} \quad (6)$$

여기서 $K_A(\alpha)$ 와 $K_B(\beta)$ 는 랑뮈어 흡착상수이다.

프로인들리히 흡착등온식은 가장 일반적인 흡착등온식으로 흡착등온식은 흡착상수와 흡착질의 농도의 $1/n$ 차에 비례하는 것으로 가정하며 아래의 Eq. (7)과 같이 정리된다.

$$q = K_F C_A^{1/n} \quad (7)$$

여기서 K_F 와 n 은 프로인들리히 흡착상수이다.

2.2 결과 및 고찰

2.2.1 흡착등온식 평가

아래 Fig. 1은 활성탄이 충전된 흡착탑에서 벤젠의 흡착을 선형흡착등온식으로 모사하여 충전탑의 거리에 따른 농도변화를 시간에 따라 도시하였다. 반응초기인 1분 후의 흡착탑 내의 농도 C/C_0 는 대부분 0을 기록하며 유입된 벤젠이 흡착탑 내에서 제거됨을 보여주고 있다. 반응시간이 증가하여 11분에 이르면 흡착탑 출구에서 C/C_0 값이 0.08 수준을 기록하여 파과($C/C_0 < 5\%$)가 시작됨을 보여주고 있으며 반응시간 60분이 경과하면 흡착탑 내에서 C/C_0 농도비율은 대부분 0.9를 상회하며 탑 내에서의 활성탄 흡착능이 포화가 되었음을 보여주고 있다.

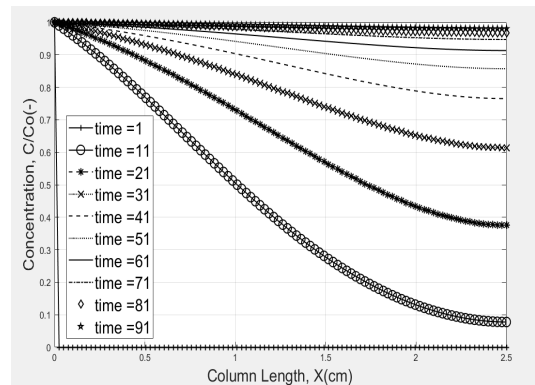


Fig. 1. Concentration variation with column length as a function of reaction time

동일한 조건에서 출구농도를 시간에 따라 도시하여 Fig. 2에 정리하였다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 활성탄을 이용한 벤젠의 흡착은 반응시간 6분까지는 100% 제거되고 이후 파과가 일어나기 시작하여 반응시간 90분이 지나면 대부분의 활성탄 흡착능이 소멸되어 $C/C_0 = 1.0$ 에 도달하게 된다.

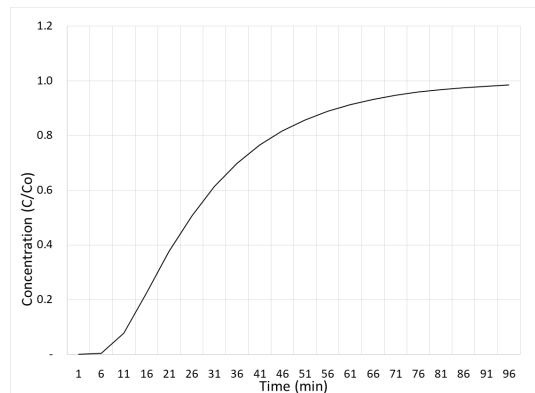


Fig. 2. Breakthrough curve of benzene in the adsorption column of activated carbon

Fig. 3은 선형흡착상수 K_d 변화에 따른 파과곡선의 변화를 도시한 결과이다. 흡착상수 K_d 가 증가할수록 흡착 구간(adsorption zone)이 길어지며 흡착량이 증가함을 보여주어 일반적인 실험결과와 정성적으로 일치하는 것을 알 수 있다. 다만, 위 모사결과만으로는 파과의 차이를 명확하게 구분하기 어려웠다.

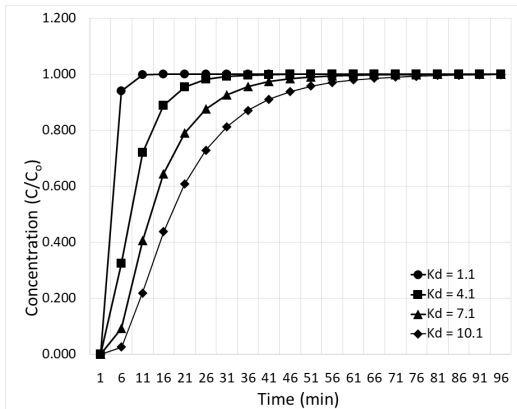


Fig. 3. Breakthrough curve of benzene with variation of LDF parameter K_d ($U = 100 \text{ cm/min}$, $D = 100 \text{ cm}^2/\text{min}$)

Fig. 4는 프로인들리히 흡착상수 n 을 2.0으로 고정하였을 때의 K_F 의 변화와 프로인들리히 흡착상수 K_F 을 4.2로 고정하였을 때의 n 의 변화에 따른 흡착량을 도시한 결과이다. 이 때, 20 °C에서 50 °C에서의 K_F 값을 기반으로 하여 K_F 를 4.2로 고정하였다. 흡착상수 K_F 는 활성탄의 흡착능 척도를 의미하는 것으로 흡착제의 흡착 사이트의 수와 관련이 있다. 흡착상수 K_F 가 클수록 흡착능이 좋으며 $\text{mg}^{-(1/n)}\text{L}^{1/n}\text{g}^{-1}$ 의 단위를 갖는다. K_F 의 증가로 흡착구간(adsorption zone)이 길어지고 흡착량이 증가하여 일반적인 실험결과와 정성적으로 일치하는 것을 알 수 있다[11-12].

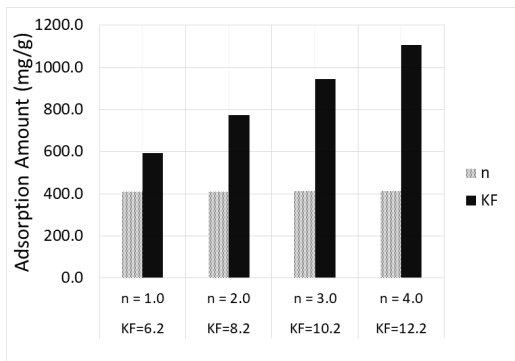


Fig. 4. Effect of Freundlich parameter n and K_F on adsorption amount of benzene over activated carbon ($U = 100 \text{ cm/min}$, $D = 100 \text{ cm}^2/\text{min}$, $n = 2.0$, $K_F = 4.2$)

흡착상수 n 은 흡착동력의 크기로 흡착된 분자 사이의 반발력에 대한 상수이다. n 이 1이면 선형흡착등온식과 동일한 형태의 식이 되어 흡착량이 선형적으로 증가하고

n 이 1 이하이면 난흡착성으로 분류되며 n 이 2 이상이면 흡착이 비교적 쉽게 일어난다. 입자표면이 균일하다면 n 의 값이 매우 커져서 흡착량이 일정해지고 식은 단분자층 흡착식인 랑뮈어 흡착등온식의 형태와 유사해진다. 파과가 일어나기 시작한 지점부터 C/C_0 가 0.9를 상회하며 흡착능이 거의 포화된 지점까지는 흡착상수 n 이 클수록 흡착속도가 증가하고 흡착이 비교적 쉽게 일어난다고 볼 수 있지만, 일정 수준을 넘어가면 n 이 클수록 흡착속도는 감소하고 흡착이 비교적 잘 일어나지 않는다. 따라서 n 에 따른 흡착량은 많은 차이를 나타내지 않는다.

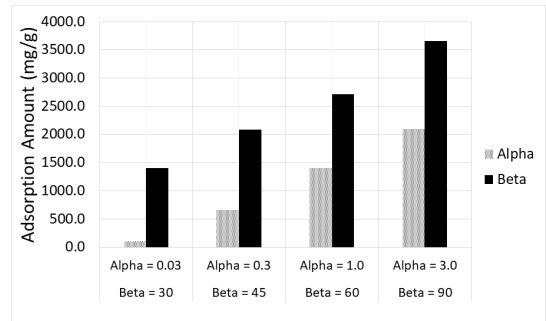


Fig. 5. Effect of Langmuir parameter Alpha and Beta on adsorption amount of benzene over activated carbon ($U = 100 \text{ cm/min}$, $D = 100 \text{ cm}^2/\text{min}$, Alpha = 1.0, Beta = 30)

Fig. 5는 랑뮈어 흡착상수 Beta를 30으로 고정하였을 때의 Alpha의 변화와 랑뮈어 흡착상수 Alpha을 1.0로 고정하였을 때의 Beta의 변화에 따른 흡착량을 도시한 결과이다. 흡착상수 Beta는 활성탄의 최대 벤젠 평형흡착량을 의미하는 것으로 평형흡착량이 증가할수록 파과는 늦게 일어난다. 평형흡착상수 Beta는 활성탄 단위질량당 최대 벤젠흡착량으로 표기되며 mg/g 의 단위를 갖는다. 일반적인 물리흡착은 반응온도가 증가할수록 평형흡착량은 감소하게 되고 Beta 값의 감소로 이어지게 된다. Beta의 증가는 반응온도 감소와 동일한 방향으로 움직이는 것이고 활성탄에 의한 벤젠의 파과는 온도가 감소할수록 보다 늦게 일어나는 것으로 묘사되어야 하며 이에 따라 흡착량이 증가하여야 한다. 위의 묘사결과에서 확인할 수 있는 바와 같이 평형흡착량의 변화가 흡착량에 미치는 영향을 잘 묘사함을 확인할 수 있다[10].

상수 Alpha의 변화는 Beta 상수의 변화보다 더욱 크게 영향을 주는 것을 확인할 수 있다. 랑뮈어 흡착상수 Alpha는 평형농도와 연계되며 평형농도가 낮게 유지되는 것은 Alpha가 증가하고 높게 유지되는 것은 감소함

을 의미한다. 화학평형에서 평형농도가 낮게 유지된다는 것의 의미는 기상에 존재하는 벤젠이 고상의 활성탄으로 이동함을 의미하는 것으로 보다 흡착이 용이하게 일어나는 것을 의미한다. 또한 평형흡착상수가 증가하면 파도가 늦게 일어나며 보다 흡착이 잘 일어나 흡착량이 증가한다는 것을 알 수 있다. 흡착반응에서 흡착량보다 평형상수가 보다 큰 영향을 주는 것으로 모사되었으며 이는 실험적인 결과들과 정성적으로 잘 일치함을 알 수 있었다[13].

2.2.2 전산모형 반응 파라미터 평가

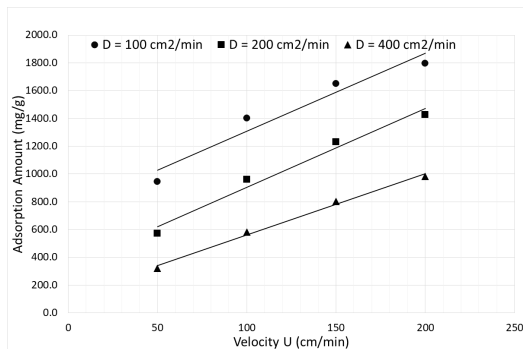


Fig. 6. Effect of gas velocity on adsorption amount of benzene over activated carbon with dispersion coefficient (Alpha = 1.0, Beta = 30)

흡착컬럼의 흡착특성은 흡착탑으로 유입되는 속도에 영향을 받으며 이는 선속도변화와 함께 축방향분산인자에 영향을 주게 된다. Fig. 6은 축방향분산계수 변화에 대하여 선속도 변화에 따른 파곡곡선의 변화를 도시한 결과이다. 선속도는 50 cm/min에서 200 cm/min까지 동일한 직경에서 유량이 증가하는 것을 기준하여 도출하였으며 분산계수를 100 ~ 400 cm²/min으로 증가시켰다. 같은 값의 분산계수에 대한 선속도 증가에서 흡착컬럼의 파곡은 선속도가 증가할수록 보다 빠른 시간에 일어나며 흡착제의 흡착능이 모두 소멸되는 시간 또한 선속도가 증가할수록 빠르게 일어난다. 선속도 증가에 따라 흡착구간(adsorption zone)이 짧아지며 흡착속도가 보다 증가한다. 선속도의 증가와 함께 유량도 증가하여 흡착량이 증가한다는 것을 위의 그림을 통해 알 수 있다.

같은 값의 선속도에 대하여 분산계수가 증가할수록 파곡이 조기에 일어난다. 본 모사조건에서는 분산계수의 영향을 고찰하기 위하여 고정된 선속도에 따라서 변화한 분산계수를 관찰하지만 실제로는 선속도 증가에 의하여 분

산계수가 증가하게 된다. 선속도 변화가 없을 때 분산계수를 증가시킬 수 있는 요인은 입자의 크기이며 입자크기와 분산계수는 Eq. (1)에 정리한 바와 같이 선형의 비례관계를 갖는다. 따라서 동일한 선속도에서 입자크기가 증가하면 파곡이 조기에 일어나며 흡착량은 감소한다. 따라서 분산계수가 증가할수록 흡착량이 감소하며 이는 위의 그림의 결과가 일반적인 실험결과와 정성적으로 잘 일치하는 것을 알 수 있다[10,12].

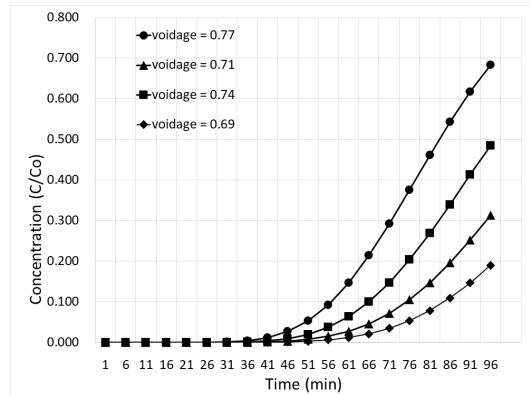


Fig. 7. Breakthrough curve of benzene with variation of bed voidage (U = 100 cm/min, D= 100cm²/min, Beta = 30, Alpha = 1.0)

Fig. 7은 컬럼에 충전된 입자의 공극률 변화에 따라 도시한 결과이다. 공극률이 낮아질수록 층내에 존재하는 입자의 질량이 증가하게 되므로 벤젠의 제거량이 증가하게 된다. 결과적으로 충전밀도의 증가는 공극률의 감소로 이어지고 결과적으로 흡착량이 증가하게 된다.

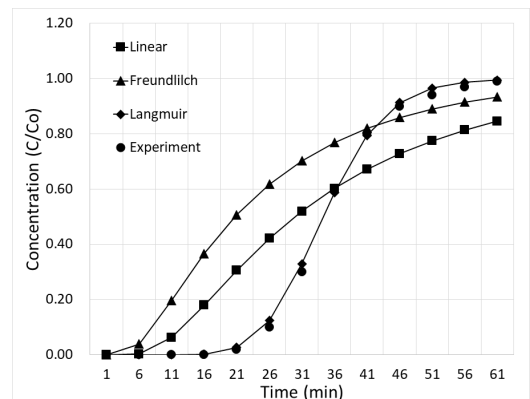


Fig. 8. Breakthrough curves of benzene with experiment and types of adsorption isotherm(Q = 80 cm³/min)

Table 2. Parameter of modeling on experiment

Modeling Type	K	n	α	β
LDF	6.0	1	-	-
Freundlich	4.2	1.1	-	-
Langmuir	-	-	3.9	7.0

Fig. 8은 실험을 통하여 나온 데이터를 도출하고 선형, 랑뮈어, 프로인들리히 흡착등온식을 모사하여 도시한 결과이다. 유량 Q가 80 cm³/min일 때의 실험데이터를 도시하고 동일한 조건에서 실험데이터의 그래프와 가장 유사하게 그래프를 도시할 수 있는 각 모델의 흡착상수를 도출하여 Table 2에 정리하였다. Fig. 8을 통해 실험 데이터의 그래프와 가장 유사한 모델의 그래프는 랑뮈어 흡착등온식을 알 수 있다[14].

3. 결론

활성탄-벤젠 흡착반응에 대하여 선형흡착, 랑뮈어흡착, 프로인들리히 흡착등온식을 평가하였으며 흡착 컬럼 전산모사를 수행하여 아래와 같은 결론을 도출하였다.

1. 흡착등온식의 흡착 속도상수는 모든 모형에서 흡착량에 가장 크게 영향을 주었으며, 랑뮈어 흡착등온식의 평형흡착량 베타가 흡착 속도상수와 유사한 수준으로 작동하였다.
2. 컬럼의 기공도와 확산계수 또한 흡착량 변화에 크게 영향을 주는 것을 확인하였으며 기공도의 경우 흡착제 종류에 따라 크게 변화하므로 흡착제 선정에 중요하게 고려되어야 함을 확인하였다.
3. 활성탄-벤젠의 실험결과를 다양한 흡착등온식을 이용하여 평가하였으며 랑뮈어 흡착등온식을 적용한 경우가 실험결과를 가장 근접하게 모사함을 확인하였다.

References

- [1] the Ministry of Environment, Master Plans for Metropolitan Air Quality Control, Policy Report, the Ministry of Environment, Korea, pp.23-36
- [2] National Institute of Environmental Research, Guidelines for Estimating National Air Pollutant Emissions, Policy Report, National Institute of Environmental Research, Korea, pp.67-81
- [3] S. S. Kim, J. H. Kim, S. W. Park, "Adsorption Analysis of Benzene Vapor in a Fixed-Bed of Granular Activated Carbon", *Korean Chemical Engineering Research*, Vol.47, No.4, pp.495-500, Aug. 2009.
- [4] L. Song, Z. Sun, L. Duan, J. Gui, G. S. McDougall, "Adsorption and diffusion properties of hydrocarbons in zeolites", *Microporous and Mesoporous Materials*, Vol.104, No.1-3, pp.115-128, Aug. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2007.01.015>
- [5] P. Liu, H. Zhang, H. Xiang, Y. Yan, "Adsorption separation for high purity propane from liquefied petroleum gas in a fixed bed by removal of alkanes", *Separation and Purification Technology*, Vol.158, pp.1-8, Jan. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.12.003>
- [6] D. Saha, N. Mirando, A. Levchenko, "Liquid and vapor phase adsorption of BTX in lignin derived activated carbon: Equilibrium and kinetics study", *Journal of Cleaner Production*, Vol.182, pp.372-378, May. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.076>
- [7] F. Gironi, V. Piemonte, "VOCs removal from dilute vapour streams by adsorption onto activated carbon", *Chemical Engineering Journal*, Vol.172, No.2-3, pp.671-677, Aug. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.06.034>
- [8] M. Fechtner, A. Kienle, "Efficient simulation and equilibrium theory for adsorption processes with implicit adsorption isotherms - Ideal adsorbed solution theory", *Chemical Engineering Science*, Vol.177, pp.284-292, Feb. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2017.11.028>
- [9] H. C. Shin, J. W. Park, K. Park, H. C. Song, "Removal characteristics of trace compounds of landfill gas by activated carbon adsorption", *Environmental Pollution*, Vol.119, No.2, pp.227-236, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(01\)00331-1](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00331-1)
- [10] K. J. Oh, D. W. Park, S. S. Kim, S. W. Park, "Breakthrough data analysis of adsorption of volatile organic compounds on granular activated carbon", *Korean Journal of Chemical Engineering*, Vol.27, No.2, pp.632-638, Mar. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11814-010-0079-9>
- [11] M. S. Hussein, M. J. Ahmed, "Fixed bed and batch adsorption of benzene and toluene from aromatic hydrocarbons on 5A molecular sieve zeolite", *Materials Chemistry and Physics*, Vol.181, pp.512-517, Sep.2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2016.06.088>
- [12] S. Kumagai, H. Ishizawa, Y. Toida, "Influence of solvent type on dibenzothiophene adsorption onto activated carbon fiber and granular coconut-shell activated carbon", *Fuel*, Vol.89, No.2, pp.365-371, Feb. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.08.013>
- [13] C. L. Chuang, P. C. Chiang, E. E. Chang, "Modeling VOCs adsorption onto activated carbon", *Chemosphere*,

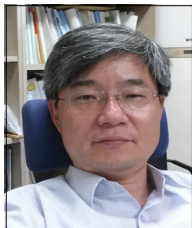
Vol.53, No.1, pp.17-27, Oct. 2003.

DOI: [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(03\)00357-6](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(03)00357-6)

- [14] A. Joly, A. Perrard, "Linear driving force models for dynamic adsorption of volatile organic compound traces by porous adsorbent beds", *Mathematics and Computers in Simulation*, Vol.79, No.12, pp.3492-3499, Aug. 2009.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2009.04.011>

유 경 선(Kyung-Seun Yoo)

[정회원]



- 1992년 2월 : 한국과학기술원 화학공학과 (화학공학석사)
- 1996년 2월 : 한국과학기술원 화학공학과 (화학공학박사)
- 1996년 3월 ~ 1999년 2월 : 포항 산업과학연구원 선임연구원
- 1999년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 환경공학과 교수

<관심분야>

대기오염방지기술, 대기환경정책

김 지 은(Ji-Eun Kim)

[정회원]



- 2017년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 환경공학과 (학사)

<관심분야>

대기오염방지기술, 대기환경정책

이 수 정(Su-Jung Lee)

[정회원]



- 2012년 3월 ~ 2017년 2월 : 한국 산업기술대학교 생명화학공학과 (학사)
- 2018년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 환경공학과 (환경공학석사)

<관심분야>

대기오염방지기술, 대기환경정책