

Adsorption removal of *p*-xylene by organo-clays

유기점토를 이용한 *p*-자일렌 흡착 제거

Yunchul Cho¹ · Taesung Kim² · Sunkee Han³ · Chaeyoung Lee^{2*}

조윤철¹ · 김태성² · 한선기³ · 이채영^{2*}

1 Dept. of Environmental Engineering, Daejeon University · 2 Dept. of Civil Engineering, The University of Suwon · 3 Dept. of Environmental Health, Korea National Open University

1 대전대학교 환경공학과 · 2 수원대학교 토목공학과 · 3 한국방송통신대학교 환경보건학과

Abstract : The purpose of this study was to investigate adsorption characteristics of organo-clays for removal of *p*-xylene. As part of efforts to examine the adsorption capacities of some organo-clays for *p*-xylene, batch isotherm tests were carried out. Organo-clay minerals were synthesized under hydrothermal conditions using Na-montmorillonite as host clay and dimethyldioctadecylammonium (DMDA) bromide and benzyldimethyldodecylammonium (BDDA) chloride as organic surfactants, respectively. All synthetic organo-clay minerals were characterized by powder x-ray diffraction (XRD), scanning electron microscope (SEM) and energy-dispersive x-ray spectroscopy (EDX). The modification using dimethyldioctadecylammonium (DMDA) bromide showed the higher adsorption ability for *p*-xylene than benzyldimethyldodecylammonium (BDDA) chloride. On the other hand, the maximum adsorption capacity, Q_{max} of DMDA modified montmorillonite estimated by Langmuir model was 27.0 mg/g, which was the higher value than other organo-clays.

Key words : Adsorption, Organo-clay minerals, *p*-xylene, Groundwater

주제어: 흡착, 유기점토, *p*-자일렌, 지하수

1. 서론

휘발성 유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs)은 25 °C에서 끓는점과 증기압이 각각 100 °C 이하이고 1 mm Hg 보다 큰 화합물을 일컫는다(Golfinopoulos et al., 2001). 휘발성 유기화합물은 페인트, 접착제, 광택제 및 세제 등과 같은 제품 속에 용제의 형태로 존재하며 다양한 산업에서 배출되고 있다. 산업공정에서 대기

로 배출되는 휘발성 유기화합물은 광화학 오존과 이차 유기 에어로졸(secondary organic aerosol) 생성의 주요 원인 중의 하나로 인간의 건강에 위해하며 심각한 환경문제를 야기한다(Hu et al., 2009). 최근 들어 벤젠, 톨루엔 및 자일렌과 같은 단핵방향족 탄화수소(monoaromatic compounds)에 의한 수질오염은 이들 물질이 갖는 독성으로 인하여 매우 심각한 문제로 인식되고 있다(Reineke et al., 2006). 특히 *p*-자일렌은 톨루엔과 이성질체인 *o*-자일렌에 비해 생물학적 분해 속도가 느리며 인체에 노출되는 경우 암을 유발할 수 있는 것으로 알려져 있다(Reinhard et

* Received 13 August 2012, revised 6 November 2012, accepted 12 November 2012.

* Corresponding author: Tel.: +82-32-220-2314, Fax: +82-32-220-2522, E-mail: chaeyoung@suwon.ac.kr

al., 2005; Yu et al., 2012). 따라서 *p*-자일렌으로 오염된 지하수를 효과적으로 정화하는 것이 필요하다. *p*-자일렌 등 단핵방향족 탄화수소를 정화할 수 있는 기술에는 전기복원 (electro remediation), 흡착(adsorption), 공기분사법 (air sparging), 여과(filtration)의 물리적 기술, 화학적 산화(chemical oxidation)와 광촉매 복원(photo catalysis remediation)의 화학적 기술, 생물복원(bioremediation), 생물분해 (biodegradation), 식물정화(phyto-remediation) 등의 생물학적 기술이 있다(Farhadian et al., 2008). 특히, 흡착공정은 운전이 용이하고 오염물질의 농도가 낮은 조건하에서 경제적이다(Seo et al., 2008). 또한 투수성 반응벽체(permeable reactive barrier, PRB) 등의 원위치(in-situ) 처리공정과 흡착탑과 같은 현장 외(ex-situ) 처리공정 모두에 적용이 가능한 장점을 지니고 있다. 흡착은 흡착제의 표면에서 흡착제와 피흡착제간의 물리·화학적 작용에 의한 것으로 효과적인 흡착을 위해서는 오염물질에 적합한 표면 특성을 갖는 흡착제의 개발이 필요하다. 흡착제로 주로 사용되는 활성탄은 표면적이 넓으나 기공분포가 불균일하고 피흡착제에 대한 선택성이 낮은 단점을 가지고 있다(Lee et al., 2008). 점토 물질의 경우 비용이 저렴하고 독성이 없으며 잠재적인 이온교환능 등 다양한 장점을 가지고 있다. 따라서 세피올라이트(sepiolite), 카올리나이트(kaolinite), 벤토나이트(bentonite), 스멕타이트(smectite) 몬모릴로나이트(montmorillonite) 등의 다양한 점토물질이 흡착제로 이용되고 있다(Vimonses et al., 2009). 최근 들어 점토의 층간사이에 다양한 계면활성제를 삽입(intercalation)하여 유기오염물질에 대한 선택성과 흡착능을 향상시킨 유기점토에 대한 관심이 높아지고 있다(Nourmoradi et al., 2012; Seliem et al., 2011). 유기점토는 유기성분과 무기성분을 동시에 가지는 유·무기 하이브리드 소재로 다양한 오염물질을 동시에 제거할 수 있는 장점을 지닐 뿐만 아니라

삽입된 유기물의 화학적 특성에 따라 유기오염물질을 선택적으로 흡착하는데 효과적이다(Lim et al., 2008). 특히 유기점토는 기존의 천연점토광물에 비해 소수성 성질이 강화되어 소수성 유기오염물질을 제거하는데 우수한 성능을 보이고 있다(Huang et al., 2004; Ketcome et al., 2009; Seliem et al., 2011).

유기점토의 합성은 일반적으로 스멕타이트군(smectite group)을 이용한다. 스멕타이트는 높은 양이온교환능력과 비표면적 및 반응성 표면적이 커서 다양한 분야에서 흡착제로 사용되고 있다(Carrado, 2000). 몬모릴로나이트와 같은 스멕타이트 광물은 층간 사이에 Ca^+ , Na^+ 또는 K^+ 와 같은 양이온이 존재하여 음전하를 띠는 층간사이의 전하균형(charge balance)을 맞춘다. 몬모릴로나이트가 친수성 표면을 가지는 주요 원인은 층간에 존재하는 무기 양이온의 수화(hydration) 때문이다(Vidal and Volzone, 2009). 일반적으로 4차 암모늄 양이온(일반적인 형태로 $[(\text{CH}_3)_2 \text{NRR}']$ 또는 $[(\text{CH}_3)_3 \text{NR}]^+$)를 이용하여 층간에 존재하고 있던 무기 양이온을 치환함으로써 친유성 점토를 합성할 수 있다(Boyd et al., 1988).

본 연구에서는 경제적인 흡착제인 몬모릴로나이트를 기본체로 사용하여 유기화합물인 계면활성제 benzyldimethyldodecylammonium(BDDA) chloride와 dimethyldioctadecyl ammonium(DMDA) bromide로 개질된 유기점토에 대하여 흡착제로서의 가능성을 평가하고자 하였다. 이를 위해 흡착대상물질인 *p*-자일렌에 대한 흡착 실험과 일련의 흡착모델에 대한 해석을 수행하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 실험재료

본 연구에서 사용된 *p*-자일렌과 유기점토의 합성에 사용된 계면활성제 BDDA chloride와 DMDA bromide는 Sigma Aldrich사에서

구매하여 사용하였으며 *p*-자일렌에 대한 특성을 Table 1에 제시하였다. 유기점토의 전구물질인 몬모릴로나이트는 Nanocar Inc.사에서 구매하여 사용하였으며 계면활성제 BDDA chloride와 DMDA bromide를 이용하여 3개의 유기점토를 합성하였다. 합성한 3개의 유기점토는 Closite®10A, Closite®15A, Nanomer®1.42E와 같은 상용화된 유기점토를 모델로 삼아 합성하였다.

2.2 실험방법 및 분석

2.2.1 유기점토 합성 방법

사전에 준비된 2 g의 몬모릴로나이트를 25 mL 탈이온수와 각 계면활성제(점토광물의 이론적 양이온교환능력의 5배에 해당하는 양)를 테플론 용기가 안에 들어있는 Parr bomb에 넣었다. Table 2에 제시한 바와 같이 BDDA, DMDA120 및 DMDA145의 이론적 양이온교환능력은 각각 120 meq/100 g, 120 meq/100 g 및 145 meq/100 g이다. 100 °C에서 24시간 동안 수열 반응에 의해 4차 암모늄 양이온이 층간사이에 있

는 Na⁺이온과 치환반응이 일어나도록 하였다. 수열처리(hydrothermal treatment) 후에 용기는 상온 하에서 냉각시킨 후 고액분리를 위해 원심분리 분리하였고 분리된 고체샘플은 건조시킨 후 *p*-자일렌 등온흡착실험에 사용하였다.

2.2.2 흡착실험 방법

유기점토의 *p*-자일렌 흡착효율을 평가하기 위해 회분식 흡착실험을 수행하였다. 흡착실험은 테플론 마개가 달린 12 mL 유리병을 사용하였으며, 초기농도를 10 mg/L로 통일하여 수행하였다. 지하수의 특성을 조사한 결과 pH와 이온강도는 각각 6.0 ~ 8.0와 1 ~ 10 mM로 나타났다(Bose and Sharma, 2002; Saleh et al., 2008). 따라서 phosphate buffer(이온강도 3.6 mM)를 이용하여 pH를 7.0으로 조절하였고 6.4 mM KCl을 이용하여 총 이온강도를 10 mM로 통일하여 실험을 수행하였다. 온도는 온도조절이 가능한 항온교반기에서 20 °C를 유지하였다. *p*-자일렌 표준 용액은 용해도를 고려하여 150 mg/L로 제조한 후 조절하여 사용하였다. 실험은 duplicate로 수행하였고 *p*-자일렌

Table 1. Properties of *p*-xylene.

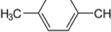
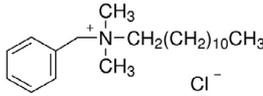
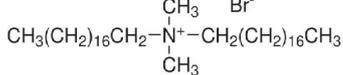
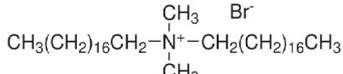
Adsorbate	Molecular formula	Molar mass	Density	Solubility	Molecular structure
<i>p</i> -xylene	C ₈ H ₁₀	106.17 g/mol	0.861 g/mL	insoluble	

Table 2. Characteristics of various synthetic adsorbents.

Adsorbents	Surfactants	Molecular structure
BDDA	Benzyltrimethyldecylammonium chloride concentration (meq/100 g of clay) = 120	
DMDA120	Dimethyldioctadecylammonium bromide concentration (meq/100 g of clay) = 120	
DMDA145	Dimethyldioctadecylammonium bromide concentration (meq/100 g of clay) = 145	

의 휘발에 대한 보정을 위하여 흡착제를 주입하지 않은 바탕실험을 수행하였다. 모든 분석시료는 친수성 PTFE syringe filter를 이용하여 여과하였으며 필터에 의한 손실량을 보정하였다.

2.2.3 흡착 해석

합성된 유기점토를 이용하여 *p*-자일렌에 대한 등온흡착현상을 해석하기 위해 Langmuir와 Freundlich 모델을 이용하였다. 흡착된 분자 간에는 상호작용이 없는 것으로 가정하는 Langmuir 흡착 등온식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_e = Q_{max} \times \frac{K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (1)$$

여기서, Q_e : *p*-자일렌 평형 흡착량(mg/g)
 Q_{max} : 최대 흡착량(mg/g)
 K_L : Langmuir 평형상수
 C_e : *p*-자일렌 평형 농도(mg/L)

불균일 표면에서의 흡착 현상을 설명하는 경우에 사용되는 Freundlich 흡착 등온식은 경험식으로 식(2)와 같이 나타낼 수 있다(Lee and Park, 2011).

$$Q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (2)$$

여기서, Q_e : *p*-자일렌 평형 흡착량(mg/g)
 K_F : Freundlich 상수
 C_e : *p*-자일렌 평형 농도(mg/L)
 $1/n$: Freundlich 상수

Nourmoradi 등(2012)는 몬모릴로나이트를 4차 양이온 계면활성제(tetradecyltrimethylammonium bromide)로 개질한 유기점토를 이용하여 benzene, toluene, ethylbenzene, xylene에 대한 흡착 특성을 규명하기 위

하여 pseudo-second-order 속도론 모델식이 사용하였다. 따라서 흡착제의 화학적 흡착 거동과 흡착용량을 규명하는 특성을 가지는 pseudo-second-order 속도론 모델식 식(3)을 사용하여 흡착제의 흡착특성을 규명하고자 하였다(Lagergren, 1898).

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \left(\frac{1}{q_e}\right) \times t \quad (3)$$

여기서, q_t : 시간 *t*에서 *p*-자일렌 흡착량(mg/g)
 k_2 : 2차 흡착반응의 속도상수(g/mg · min)
 q_e : *p*-자일렌 평형 흡착량(mg/g)
 t : 흡착반응시간(min)

2.2.4 분석방법

p-자일렌의 농도 분석은 Gas chromatography (Agilent 7890A, USA)를 이용하여 수행하였으며, 분석조건은 다음 Table 3에 제시하였다.

Table 3. GC operating conditions.

Class	Condition
Carrier gas	Nitrogen (99.999 %)
Pressure	5 psi
Detector	Flame ionization detector
Column	HP-5 (Internal diameter 0.32 mm, film width 0.25 μm, length 30 m)
Oven Temp	50 °C for 5 min, 5 °C/min to 70 °C, 3 °C/min to 80 °C
Injector Temp	270 °C
Detector Temp	270 °C

유기점토의 특성화를 위해 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM), energy-dispersive x-ray spectroscopy(EDX)와 powder x-ray diffraction(XRD) 분석을 수행하였다. SEM은 Stereoscan 440(Leica Cambridge, Germany)을 이용하였으며 EDX는 Oxford model 6587 (Oxford Instruments, England)를 사용하여 분석을 수행하였

다. XRD는 D8 Advance (Bruker Corporation, Germany)를 사용하여 유기점토의 특성을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 흡착제 특성

3.1.1 유기점토의 SEM 및 EDX 분석

Fig. 1은 합성된 유기점토의 SEM 이미지를 제시하고 있다. 기본체인 몬모릴로나이트(Fig. 1a)와 비교하였을 때 유기점토(Fig. 1b-d)가 각 입자들이 다소 엉성하게 엉겨있는 것을 확인할

수 있었다. 이와 같은 현상은 계면활성제로 삽입(intercalation) 시킬 때 혼합에 의한 입자간의 엉김이 줄어들어 것에 기인한다. Fig. 2와 Table 4는 EDX 분석 결과를 제시하고 있다. 몬모릴로나이트의 원소조성은 O, Na, Mg, Al 및 Si 등으로 나타났다. 유기점토인 BDDA, DMDA120 및 DMDA145는 전체 원소 중 탄소(C)의 구성 비율이 각각 41.95 %, 44.49 % 및 45.40 %로 나타났다. 탄소가 검출되는 경우 몬모릴로나이트 층간에 존재하고 있던 나트륨 이온(Na^+)이 검출되지 않아 나트륨 이온(Na^+)이 BDDA chloride와 DMDA bromide로 치환된 것으로 판단된다.

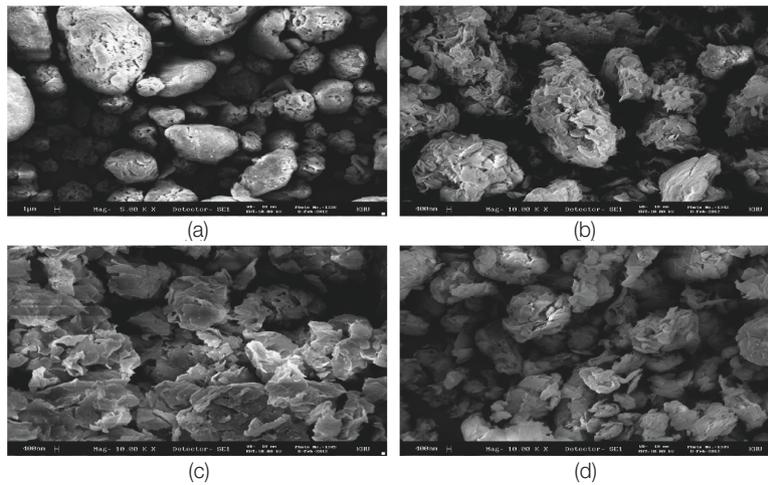


Fig. 1. SEM images of organo-clays (a: montmorillonite, b: BDDA, c: DMDA120, d: DMDA145).

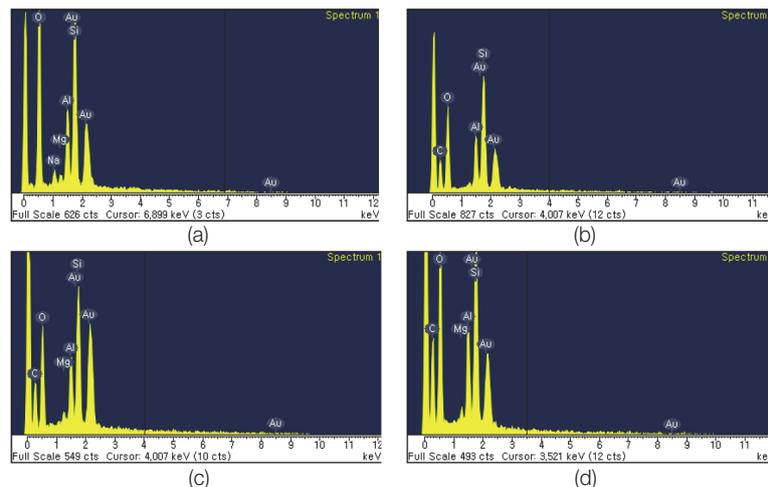


Fig. 2. EDX images of organo-clays (a: montmorillonite, b: BDDA, c: DMDA120, d: DMDA145).

Table 4. Elemental compositions of organo-clays.

Sample	Elemental composition (%)					
	C	O	Na	Al	Si	Other
Montmorillonite	-	77.19	2.27	5.30	12.07	3.17
BDDA	41.95	46.75	-	6.82	3.15	1.33
DMDA120	44.49	43.58	-	2.90	6.16	2.87
DMDA145	45.40	45.40	-	2.50	5.32	1.38

3.1.2 유기점토의 XRD 특성

높은 양이온교환능력을 가진 몬모릴로나이트는 Fig. 3(a)에서 제시된 것과 같이 d -spacing 값이 12.40Å로 나타났다. 몬모릴로나이트의 층간사이에 있는 Na⁺를 양이온 계면활성제인 BDDA chloride 및 DMDA bromide로 이온교환을 통해 치환함으로써 몬모릴로나이트의 층간간격 d -spacing 값이 증가하였다. Fig. 3(b)와 같이 BDDA는 BDDA chloride 농도(meq/100 g clay = 120)로 개질한 후 d -spacing 값이 12.40Å에서 20.05Å으로 증가하였으며, Fig. 3(c)와 같이 DMDA120은 DMDA bromide 농도 (meq/100 g clay = 125)로 개질한 후에 d -spacing 값이 12.40Å에서 26.74Å로 증가하였다. Fig. 3(d)와 같이 DMDA145는 DMDA bromide 농도(meq/100 g clay = 145)를 더 높게 하여 개질을 하였으며 d -spacing 값이 12.40Å에서 31.29Å로 증가하였다. 개질에 사용된 DMDA bromide의 농도가 증가할수록 층간사이의 간격(001 d -spacing 값)이 증가하였다. 또한 층간사이에 있는 Na⁺를 BDDA chloride보다 DMDA bromide를 사용하여 치환하였을 때 층간 사이가 더 증가하는 것을 확인하였다. 이러한 층간간격의 증가는 개질된 몬모릴로나이트의 층간사이로 p -자일렌이 치환 시 이동을 용이하게 하는데 도움이 될 것으로 판단된다.

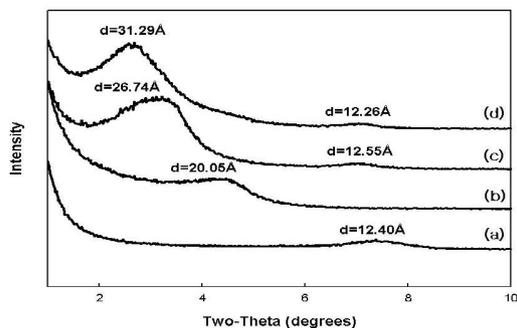


Fig. 3. XRD patterns of organo-clays synthesized at different conditions (a: montmorillonite, b: BDDA, c: DMDA120, d: DMDA145).

3.2 p-자일렌 동역학 흡착 실험

BDDA, DMDA120 및 DMDA145의 소재를 이용해 동일한 실험조건(pH 7, 온도 20 °C, 이온강도 10 mM, p -자일렌의 초기농도 10 mg/L)에서 실험을 수행하여 시간에 따른 흡착량을 확인하였다(Fig. 4). 각각의 흡착제 주입량은 모두 1 g/L로 주입하였다. 평형농도에 도달하였을 때 BDDA, DMDA120 및 DMDA145의 잔류농도는 각각 6.16 mg/L, 5.32 mg/L 및 3.82 mg/L로 나타났다. 또한 흡착제 모두가 20분 이내에 평형 흡착에 도달하는 것을 확인할 수 있었다.

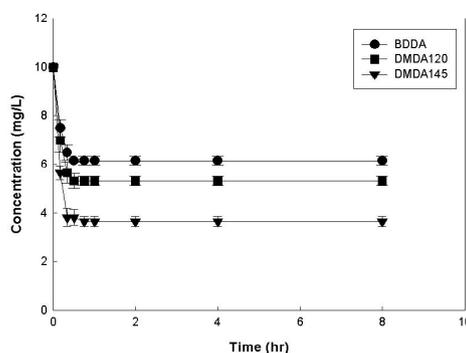


Fig. 4. Adsorption characteristics of p -xylene (a: montmorillonite, b: BDDA, c: DMDA120, d: DMDA145).

Fig. 5는 정량적인 분석을 위해 식 (3)의 pseudo-second-order 속도론 모델을 적용하여 얻어진 결과이다. 모델을 적용하여 얻어

진 이론적 흡착용량($q_e(\text{theor.})$)과 2차 반응속도 상수는 Table 5에 제시하였다. 이론적 흡착용량($q_e(\text{theor.})$)은 초기농도 10 mg/L에서 20 분 이내에 평형농도에 도달하였을 때 BDDA, DMDA120 및 DMDA145의 흡착용량으로 산정하였다. 흡착용량을 비교한 결과 DMDA145가 가장 높게 나타났다. 4차 암모늄 양이온 계면활성제인 BDDA chloride는 벤질기(benzyl group)에 의해 오염물질을 흡착제거하고 DMDA bromide 경우 메틸기(methyl group)에 의해 오염물질을 제거하는 것으로 판단된다. 따라서 DMDA bromide가 BDDA chloride보다 상대적으로 높은 흡착능을 보여 작용기인 메틸기(methyl group)가 벤질기(benzyl group)보다 *p*-자일렌에 대한 화학적 친화력이 큰 것으로 판단된다(Seliem et al., 2011). 이러한 강한 친화력은 메틸기(methyl group)와 *p*-자일렌간의 파이결합(π bonds)에 기인하며 이로 인해 메틸기(methyl group)가 아닌 다른 반응기를 가진 계면활성제에 비해 흡착능이 향상된 것으로 판단된다(Carvalho et al., 2012).

pseudo-second-order 속도론 모델식을 사용하여 해석한 결과, 이론적 흡착용량($q_e(\text{theor.})$)과 실험적 흡착용량($q_e(\text{exp.})$)이 차이가 나지 않으며 상관계수(R^2)가 0.99이상으로 나타났다. DMDA145는 BDDA와 DMDA120보다 빠른 흡착동역학 속도상수를 보였으며 이는 개질된 유기점토의 층간사이 간격의 차이에 기인하는 것으로 판단된다. DMDA145의 평균 층간사이의 간격(3.12 nm)이 나머지 두 개의

유기점토(BDDA와 DMDA120의 층간사이 간격은 각각 2.00 nm와 2.67 nm)의 층간사이의 간격보다 크기 때문에 상대적으로 *p*-자일렌이 공극내부로 침투하는 속도가 증대되었기 때문으로 판단된다. 또한 계면활성제 DMDA bromide가 BDDA chloride보다 파라-자일렌에 대한 화학적 친화력이 높아 흡착 속도가 증대된 것으로 판단된다.

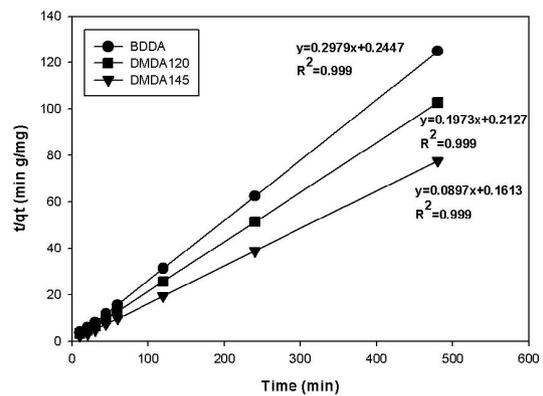


Fig. 5. Pseudo-second-order plots for *p*-xylene on organo-clays.

3.3 등온 흡착 실험

유기점토의 등온흡착현상의 해석을 위해 등온흡착모델로 사용되는 Langmuir와 Freundlich 모델을 이용하여 등온흡착실험결과를 비교하였다. 각각의 흡착제 주입량을 변화시켜 등온흡착 실험을 수행한 후 두 개의 등온흡착모델을 적용하여 결과를 모사하였다(Table 6). 사용된 세 개의 유기점토 모두에 대하여 Freundlich식의 상관계수(R^2)가 상대적으로 1에 가까워 다양한 공

Table 5. Interpretation of experimental results into second-order kinetic models.

Adsorbate	Adsorbent	$q_e(\text{exp.})$ (mg/g)	Second-order rate constants		
			k_2 (g/mg · min)	$q_e(\text{theor.})$ (mg/g)	R^2
<i>p</i> -xylene	BDDA	3.841	0.2276	3.861	0.999
	DMDA120	4.676	0.2319	4.701	0.999
	DMDA145	6.178	0.2921	6.200	0.999

Table 6. Summary of *p*-xylene adsorption onto organo-clays.

Adsorbent	Langmuir model constant			Freundlich model constant		
	Q_{\max} (mg/g)	K_L	R^2	1/n	K_F	R^2
BDDA	7.70	0.08	0.93	0.54	1.06	0.98
DMDA120	14.70	0.75	0.89	0.89	1.59	0.98
DMDA145	27.00	0.13	0.94	0.62	1.66	0.97

극크기와 원소조성을 갖는 유기점토에 대한 *p*-자일렌 흡착현상은 Freundlich 모델이 보다 잘 묘사됨을 알 수 있었다. 이는 유기점토가 다양한 원소조성과 공극크기를 갖으며 균일한 표면의 단일층으로 흡착되는 것이 아니라 표면이 불균일한 흡착에너지에 의해 선택적으로 흡착되는 것으로 판단된다(Tan et al., 2008). Freundlich 식을 적용한 결과, 세 개의 유기점토에 대한 K_F 를 비교하였을 때, DMDA145의 K_F 값이 1.66으로 가장 높게 나타났다. 단위질량당 Q_{\max} (최대 흡착량)을 추정할 수 있는 Langmuir식을 적용하여 세 개의 유기점토를 비교하였을 때 BDDA와 DMDA120은 7.70 mg/g과 14.70 mg/g이며, Freundlich식을 적용하였을 때와 마찬가지로 DMDA145는 27.00 mg/g으로 가장 높게 나타났다. 이러한 유기점토들의 *p*-자일렌에 대한 최대흡착량은 기존 문헌에 제시된 개질되지 않은 몬모릴로나이트의 *p*-자일렌에 대한 최대 흡착량값(2.02 mg/g) 비해 높은 값을 나타내었다(Çakanyıldırım and Cabbar, 2008). 따라서 층간사이에 삽입된 계면활성제로 인해 *p*-자일렌에 대한 선택성과 흡착능이 향상된 것으로 판단된다.

4. 결론

4차 암모늄($[(CH_3)_3NR]^+$)인 BDDA chloride와 DMDA bromide 계면활성제를 몬모릴로나이트와 수열반응조건에서 반응시켜 제조된 선택

성 흡착제들의 흡착능 비교 실험으로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 몬모릴로나이트의 층간사이의 무기양이온 Na^+ 를 4차 암모늄 양이온과 치환하여 친유기성 점토를 합성할 수 있었다.
- 2) XRD 분석 결과, BDDA chloride와 DMDA bromide의 계면활성제에 의해 개질된 BDDA, DMDA120 및 DMDA145는 몬모릴로나이트와 비교할 때 층간사이 간격이 각각 0.77 nm, 1.43 nm 및 1.89 nm 증가하였다. 이러한 층간간격의 팽창은 4차 암모늄이온이 나트륨 이온(Na^+)을 치환했음을 나타내 준다.
- 3) DMDA145의 흡착용량이 높은 것으로 보아 DMDA bromide가 *p*-자일렌에 대한 화학적 친화력이 크다고 판단된다.
- 4) BDDA, DMDA120 및 DMDA145를 Freundlich와 Langmuir모델을 적용한 결과, 각각의 K_F 는 1.06, 1.59 및 1.66이었으며, Q_{\max} 는 각각 7.70 mg/g, 14.70 mg/g 및 27.00 mg/g로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 2012년도 GAIA 프로젝트(환경부) “토양·지하수오염방지기술개발사업(G112-17003-0043-0)”의 일환으로 수행되었으며, 유기점토 합성에 도움을 준 펜실베이니아 주립대 Dr. Sridhar Komarneni 연구팀에게 감사드립니다.

참고문헌

- Bose, P. and Sharma, A. (2002) Role of iron in controlling speciation and mobilization of arsenic in subsurface environment, *Water Research* 36(19), 4916-4926.
- Boyd, S.A., Mortland, M.M., and Chiou, C.T. (1988) Sorption characteristics of organic compounds on hexadecyltrimethylammonium-smectite, *Soil Science Society of America Journal*, 52(3), pp. 652-657.
- Çakanyıldırım, Ç. and Cabbar, H.C. (2008) Adsorption of p-xylene in dry and moist clay, *Journal of International Environmental Application and Science*, 3(1), pp. 29-36.
- Carrado, K.A. (2000) Synthetic organo- and polymer-clays: preparation, characterization, and materials applications, *Applied Clay Science*, 17(1-2), pp. 1-23.
- Carvalho, M.N., da Motta, M., Benachour, M., Sales, D.C.S., and Abreu, C.A.M. (2012) Evaluation of BTEX and phenol removal from aqueous solution by multi-solute adsorption onto smectite organoclays, *Journal of Hazardous Materials*, 239-240(5), pp. 95-101.
- Farhadian, M., Vachelard, C., Duchez, D., and Larroche, C. (2008) In-situ bioremediation of monoaromatic pollutants in groundwater: A review, *Bioresource Technology*, 99(13), pp. 5296-5308.
- Golfinopoulos, S.K., Lekkas, T.D., and Nikolaou, A.D. (2001) Comparison of methods for determination of volatile organic compounds in drinking water, *Chemosphere*, 45(3), pp. 275-284.
- Hu, Q., Li, J.J., Hao, Z.P., Li, L.D., and Qiao, S.Z. (2009) Dynamic adsorption of volatile organic compounds on organofunctionalized SBA-15 materials, *Chemical Engineering Journal*, 149(1-3), pp. 281-288.
- Huang, L., Xiao, H., and Ni, Y. (2004) Cationic MCM-41: synthesis, characterization and sorption behavior towards aromatic compounds, *Colloids and Surfaces*, 247(1-3), pp. 129-136.
- Ketcome, N., Grisdanurak, N., and Chiarakorn, S. (2009) Silylated rice husk MCM-41 and its binary adsorption of water-toluene mixture, *Journal of Porous Materials*, 16(1), pp. 41-46.
- Lagergren, S. (1898) Zur theorie der sogenannten adsorption gelöster stoffe, *K. Sven. Vetenskapsakad. Handl.*, 24(4), pp. 1-39.
- Lee, C.Y. and Park, S.Y. (2011) Adsorption characteristics of surfactants on soil, *Journal of Korean Geo-environmental Society*, 12(10), pp. 23-28.
- Lee, H.Y., Lee, K.D., and Park, S.W. (2008) Influence of surface characteristics of mesoporous silica on Pb(II) and Cd(II) adsorption behavior, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 30(6), pp. 673-679.
- Lim, S.H., Chang, J.Y., Han, M.J., Hong, S.M., Um, M.K., and Hwang, S.H. (2008) Technology for hyper-structure control of organic/inorganic hybrid, *Polymer Science & Technology*, 19(6), pp. 530-540.
- Nourmoradi, H., Nikaeen, M., and Khiadani, M. (2012) Removal of benzene, toluene, ethylbenzene and xylene (BTEX) from aqueous solutions by montmorillonite modified with nonionic surfactant: Equilibrium, kinetic and thermodynamic study, *Chemical Engineering Journal*, 191(15), pp. 341-348.
- Reineke, V., Rullkötter, J., Smith, E.L., and Rowland, S.J. (2006) Toxicity and compositional analysis of aromatic hydrocarbon fractions of two pairs of ungraded and biodegraded crude oils from the Santa Maria (California) and Vienna Basins, *Organic Geochemistry*, 37(12), pp. 1885-1899.
- Reinhard, M., Hopkins, G.D., Steinle-Daring, E., and LeBron, C.A. (2005) In-situ biotransformation of BTEX compounds under methanogenic conditions, *Ground Water Monitoring & Remediation*, 25(4), pp. 50-59.

- Saleh N., Kim, H.J., Phenrat, T., Matyjaszewski, K., Tilton, R.D., and Lowry, G.V. (2008) Ionic strength and composition affect the mobility of surface-modified Fe⁰ nanoparticles in water-saturated sand columns, *Environ. Sci. Technol.* 42(9), pp. 3349-3355.
- Seliem, M.K., Komarneni, S., Cho, Y., Lim, T., Shahien, M.G., Khalil, A.A., and Abd EI-Gaid, I.M. (2011) Organosilicas and organo-clay minerals as sorbents for toluene, *Applied Clay Science*, 52(1-2), pp. 184-189.
- Seo, M.W., Suk, H.J., Choi, D.H., and Kim, J.H. (2008) Evaluation on efficiency of VOC removal in groundwater using diffused aeration system, *Journal of the Korean Geo-environmental Society*, 9(2), pp. 31-37.
- Tan, I.A.W., Ahmad, A.L., and Hameed, B.H. (2008) Adsorption of basic dye on high-surface-area activated carbon prepared from coconut husk, *Journal of Hazardous Materials*, 154(1-3), pp. 337-346.
- Vidal, N.C. and Volzone, C. (2009) Analysis of tetramethylammonium-montmorillonite and retention of toluene from aqueous solution, *Applied Clay Science*, 45(4), pp. 227-231.
- Vimonses, V., Lei, S., Jin, B., Chow, C.W.K., and Saint, C. (2009) Kinetic study and equilibrium isotherm analysis of Congo Red adsorption by clay materials, *Chemical Engineering Journal*, 148(2-3), pp. 354-364.
- Yu, F., Wu, Y., and Ma, J. (2012) Influence of the pore structure and surface chemistry on adsorption of ethylbenzene and xylene isomers by KOH-activated multi-walled carbon nanotubes, *J. of Hazardous Materials*, 237-238, pp. 102-109.