

이성분 휘발성유기화합물(Toluene-MEK)의 활성탄 흡착 및 탈착 특성

유선아¹, 조종훈², 박지윤², 이영우^{2,*}

¹충남대학교 일반대학원 응용화학공학과
34134 대전광역시 유성구 대학로 99
²충남대학교 에너지과학기술대학원
34134 대전광역시 유성구 대학로 99

(2017년 8월 25일 접수; 2017년 9월 7일 수정본 접수; 2017년 9월 27일 채택)

Adsorption and Desorption Characteristics of Binary-component Volatile Organic compounds (Toluene-MEK) on Activated Carbon

Seon A Yu¹, Jong Hoon Cho², Ji Yun Park², and Young Woo Rhee^{2,*}

¹Chemical Engineering and Applied Chemistry, Chungnam National University
99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34134, Korea

²Graduate School of Energy Science and Technology, Chungnam National University
99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34134, Korea

(Received for review August 25, 2017; Revision received September 7, 2017; Accepted September 27, 2017)

요 약

본 연구는 상용활성탄을 사용하여 산업공정에서 많이 사용되는 휘발성 유기화합물 중 톨루엔, 메틸에틸케톤(MEK), 이성분계(톨루엔-MEK)를 대상으로 흡착 및 탈착특성을 고찰하였다. 최적탈착온도를 설정하기 위해 온도별 탈착특성을 고찰하였고, 활성탄의 특성을 파악하기 위해 BET분석을 하였다. 상온에서 흡착실험을 진행하였고, 120 °C까지 승온하여 탈착실험을 진행하였다. 이 실험을 10회 반복해서 진행하였다. 이를 통해 단일성분에서는 반복횟수가 많아질수록 흡착 및 탈착능이 줄어들며 활성탄과 상대적으로 친화력이 적은 MEK의 경우 톨루엔보다 낮은 흡착 및 탈착능을 보였다. 이성분계의 흡착 및 탈착 반복시험에서 친화력이 낮은 MEK가 먼저 파과되고 결과적으로 주입 농도보다 높은 농도로 탈착되었다.

주제어 : 휘발성 유기화합물, 흡착, 탈착, 톨루엔, 메틸에틸케톤, Roll-up 현상

Abstract : In this study, we have investigated the characteristics of adsorption and desorption of toluene, methyl ethyl ketone (MEK) and their binary component using activated carbon. The BET analysis was performed to identify the characteristics of the activated carbon, and the desorption characteristics with temperature were examined to find out an optimum desorption temperature. Ten cyclic experiments of adsorption-desorption were performed, where each adsorption temperature was maintained at room temperature and desorption temperature at upto 120 °C. In case of single component cyclic test, the efficiencies of adsorption and desorption decreased as the cycle increased. MEK which has lower affinity with activated carbon than toluene showed lower efficiencies of adsorption and desorption. In case of binary component cyclic test, a typical roll-up phenomenon was observed during adsorption process, where MEK reaches at breakpoint first and then was swept out by toluene.

Keywords : Volatile organic compounds, Adsorption, Desorption, Toluene, MEK, Roll-up phenomenon

1. 서 론

휘발성 유기화합물(volatile organic compounds, VOCs)은 대

부분의 화학공장 및 제약공장 그리고 용매 및 세정제를 사용하는 일반 사업체에서 광범위하게 배출되고 있다. 대기환경 보전법에 기반을 두어 VOCs을 관리 및 규제를 하고 있다.

* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: ywrhee@cnu.ac.kr; Tel: +82-42-821-7678; Fax: +82-42-822-7286

doi: 10.7464/ksct.2017.23.4.421 pISSN 1598-9712 eISSN 2288-0690

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

하지만 비용과 환경적인 측면에서 열악한 현장의 배출 상황을 고려하면 더 효과적이고 경제적인 휘발성 유기물질 처리를 위한 기술개발이 필요하다. 국내외에서 사용되고 있는 휘발성 유기화합물은 주로 방향족과 케톤류이다. 그중 방향족은 톨루엔이 케톤류는 메틸에틸케톤(methyl ethyl ketone, MEK)이 많이 사용되고 있다. MEK는 살충제, 인쇄 잉크, 다양한 고분자 물질의 용매 등으로 널리 사용되지만, 처리기술에 관련한 연구가 미흡한 실정이다[1-3].

현재 국내외 여러 분야에서 활용되고 있는 휘발성 유기화합물의 처리기술은 관리가 안정적인 흡착방식이다[4-6]. 흡착 방식에서 가장 많이 활용되는 흡착제인 활성탄은 독특한 물리적 특성과 표면에 다양한 화학적 특징으로 많은 흡착질의 흡착제로 활용되고 있다. 특히 입상 활성탄의 세공은 미세기공부터 큰 기공까지 다양하게 존재하기 때문에 기상 흡착에 있어서 더 유리하며, 자연발화 온도가 높고 경도가 우수하여 산업현장에서 널리 사용되고 있다. 그러나 활성탄은 다른 흡착제보다 단위 무게당 비용이 저렴하지만 많은 양을 사용해야하므로 적지 않은 비용이 소모된다. 그리고 사용된 활성탄의 경우 폐처리비용도 발생하기 때문에 재생활성탄의 사용은 운영비 절감과 자원을 보호할 수 있는 좋은 방법이다[7,8].

활성탄을 재생하는 기술은 압력을 낮춰 흡착질을 탈착시키는 감압재생법, 외부에서 열을 가해 온도를 높이는 가열탈착법, 흡착질의 화학적 성질을 바꾸는 화학재생법, 흡착질에 대해 친화력이 좋은 용매를 사용해서 재생하는 용매재생법, 흡착된 흡착질보다 친화력이 좋은 물질로 치환시키는 치환재생법이 있다[9-11].

본 연구에서는 톨루엔, MEK, 이성분계(톨루엔-MEK)의 흡착 및 탈착특성을 파악하고 활성탄의 성능을 평가하기 위해서 활성탄에 톨루엔과 MEK의 흡착 및 탈착실험을 반복적으로 수행하였다. 활성탄 재생방법으로 가열탈착법을 사용하였다. 단일 성분의 흡착 및 탈착실험을 통하여 우수한 성능을 보이는 방향족탄화수소인 톨루엔과 비교를 통해 MEK의 흡착 및 탈착 특성을 파악하였다. 이성분계(톨루엔-MEK)의 흡착 및

탈착 실험을 통해 두 성분간 경쟁흡착에 대해 고찰하였다.

2. 실험방법

2.1. 실험재료

본 실험에서 사용한 활성탄은 입상활성탄인 Calgon Carbon Corporation의 상용 활성탄을 사용하였다. 활성탄은 파쇄하여 20~50 mesh의 입자를 사용하였다. 활성탄의 기공 안에 남아 있는 수분 및 기타 물질을 제거하기 위해 건조기에 넣어 100 °C에서 24 h 동안 건조하였다. 활성탄의 물리적 특성을 파악하기 위해 75 μm 이하로 파쇄하여 Micromeritics사의 ASAP-2020을 사용하여 Brunauer Emmett Teller (BET)분석을 하였다.

2.2. 실험 장치 및 실험방법

Figure 1에 흡착 및 탈착 반응기의 모식도를 나타내었다. 반응기는 pyrex 유리관으로 내경 10 mm, 외경 30 mm, 길이 500 mm이며, 중심에 활성탄을 고정할 수 있게 제작하였다. 실험에 사용한 활성탄의 무게는 0.5 g이다. 탈착 시, 활성탄온도를 높이기 위하여 반응기 외부에는 가열로를 설치하였고, 활성탄온도를 측정하기 위해 활성탄이 쌓인 중간지점에 온도 센서를 설치하였다. 가열로와 온도센서는 온도조절장치에 연결되어 반응기 내부의 온도조절을 할 수 있게 설치하였다. 흡착실험은 상온에서 진행하였고, 탈착실험은 상온에서 120 °C까지 10 h 동안 0.15 °C min⁻¹의 속도로 온도를 올리면서 진행하였다. 단일성분의 흡착 및 탈착실험은 10회 반복하였으며, 이성분계 흡착 및 탈착 실험은 5회 반복하여 진행하였다.

흡착에 사용되는 가스는 유량계(mass flow controller, MFC)를 통해 150 mL min⁻¹으로 반응기 하단으로 주입된다. 주입 가스는 반응기 안에서 활성탄과 반응하고 이후 반응기 상단으로 배출된다. 배출가스는 Dong-il Shimadzu의 GC-2010 가스 크로마토그래피(gas chromatography, GC)로 분석하였다. Table 1에 휘발성 유기화합물을 측정하기 위한 GC의 분석조건을 나타내었다.

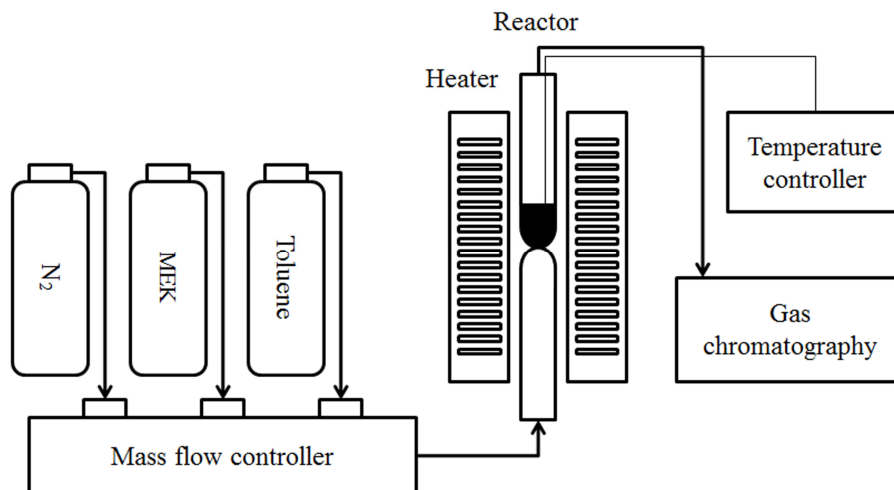


Figure 1. Schematic diagram of experimental equipment.

Table 1. Condition of gas chromatography

Column	DB-VRX 30.0 m 1.40 μm 0.25 mmID
Detector	FID
Oven column temperature	45 °C
Injector temperature	200 °C
Detector temperature	250 °C
Carrier gas and flow rate	N ₂ and 30 mL min ⁻¹
Flame gas	H ₂ 40 mL min ⁻¹ and Air 400 mL min ⁻¹
Split ratio	50 : 1
Injector volume	3 mL min ⁻¹

Table 2. Effects of desorption temperature for toluene and MEK

	Desorption temperature [°C]	q _a [g _{adsorption} / g _{activated carbon}]	q _d [g _{desorption} / g _{activated carbon}]	d _r [q _a /q _d]
MEK	60	0.14	0.13	93
	80	0.17	0.17	100
	100	0.17	0.17	100
Toluene	100	0.32	0.30	95
	120	0.31	0.31	100
	140	0.31	0.31	100

3. 결과 및 고찰

3.1. 활성탄의 물리적 특성

활성탄의 BET 분석 결과를 Figure 2에 나타내었다. Figure 2(a)에 흡착 및 탈착곡선을 나타내었다. 이는 Langmuir형 등온선으로, 흡착 및 탈착이 단분자층으로 진행되며[12,13], micropore가 많은 것으로 보였다. Figure 2(b)에 BJH model의 세공분포를 나타내었다. 20 Å 이하 micro 크기의 분포가 가장 많으며 20~40 Å 이하의 meso 크기를 가진 세공은 약 0.2 cm³ g⁻¹ 정도의 세공용적을 보였다. BET 분석결과로 활성탄은 micro 세공을 가진 입자이며, 비표면적은 898 m² g⁻¹, 평균 세공직경은 2.15 nm이다.

3.2. 톨루엔과 MEK의 최적 탈착 온도

톨루엔과 MEK의 최적 탈착 온도를 파악하기 위해 각 끓는점 근처의 온도에서 탈착실험을 진행하였다. 사용된 활성탄의 단위 질량당 흡착된 가스의 질량(q_a), 사용된 활성탄의 단위 질량당 탈착된 가스의 질량(q_d)을 측정하여 흡착량과 탈착량의 비율을 Equation (1)과 같이 탈착률(d_r)로 나타냈다.

$$d_r = \frac{q_d}{q_a} \times 100 \quad (1)$$

3.3. 단일성분의 흡착 및 탈착

Figure 3에 톨루엔과 MEK 두 성분의 반복흡착 및 탈착실험을 반응시간에 따른 농도변화로 나타내었다. Figure 3(a)와 Figure 3(b)는 톨루엔의 흡착곡선과 탈착곡선을 나타내었다. 톨루엔 단일흡착의 경우, 톨루엔이 150~200 min까지 배출이 되지 않다가 이후 배출되기 시작하였다. 반복실험의 흡착경향은 비슷하였으나 반복횟수가 증가할수록 배출되는 시간이 감소하였다. 250~300 min 이후에는 활성탄에 톨루엔이 흡착하지 못하여 주입농도와 배출농도가 같아졌다. 톨루엔의 단일탈착의 경우, 반응시간이 증가할수록 배출되는 농도가 감

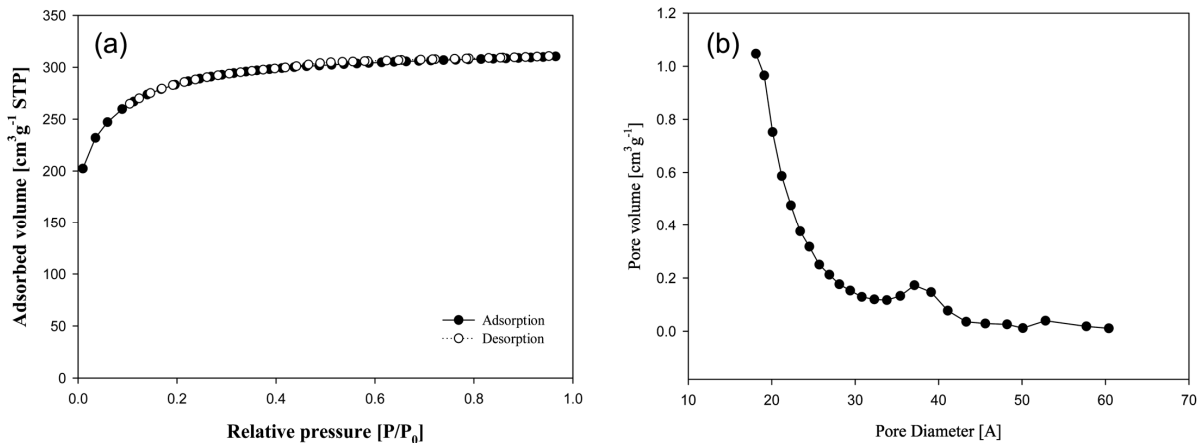


Figure 2. Characteristics of activated carbon : (a) Isotherm of adsorption and desorption (b) BJH pore size distribution.

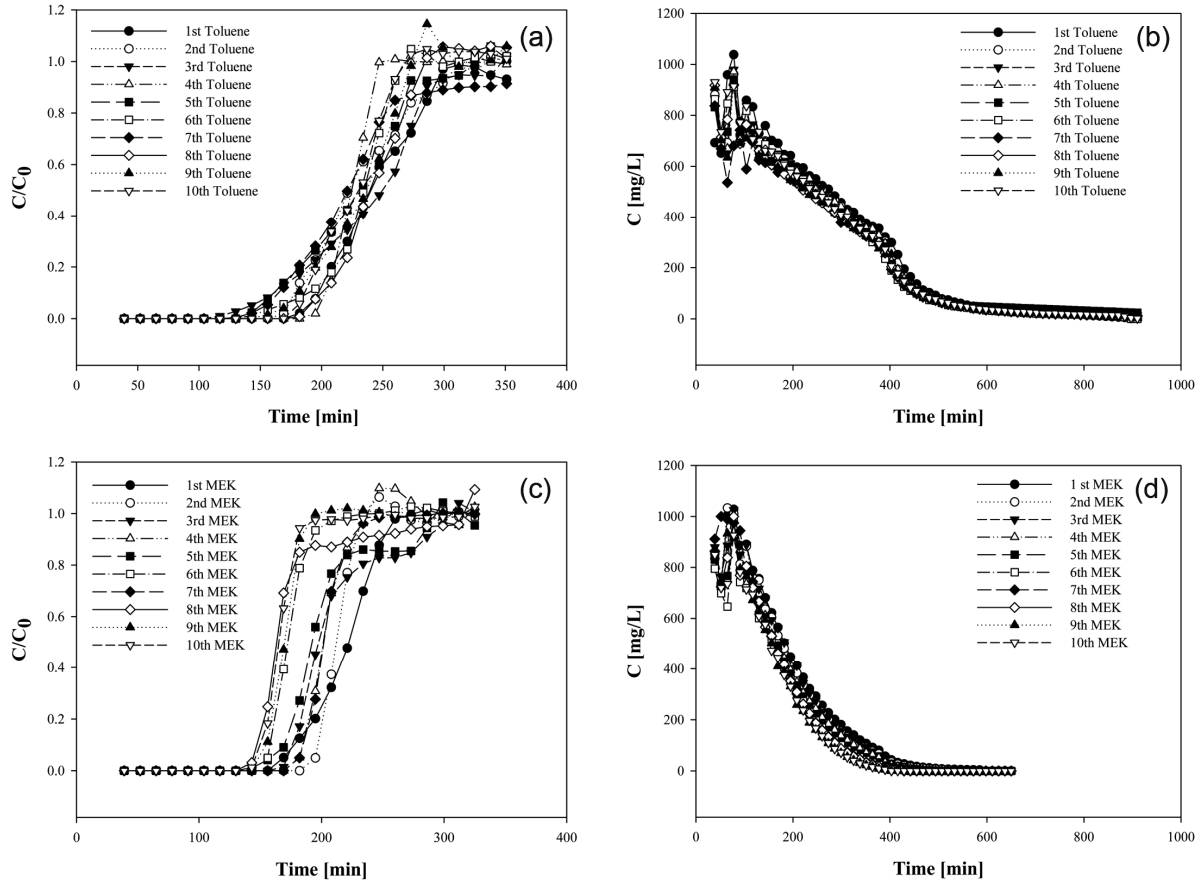


Figure 3. Concentration of adsorption and desorption for toluene and MEK : (a) Adsorption of toluene, (b) Desorption of toluene, (c) Adsorption MEK, (d) Desorption MEK.

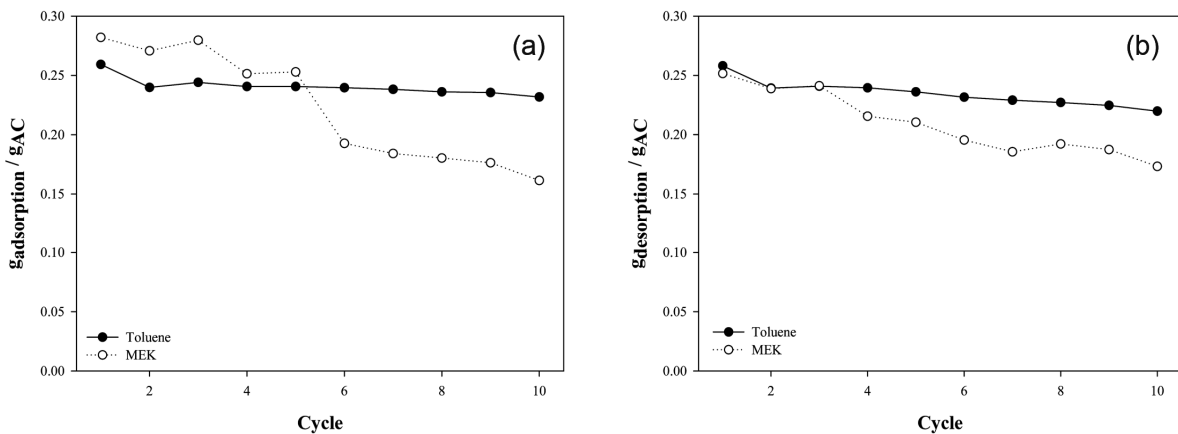


Figure 4. Amounts of adsorption and desorption for toluene and MEK in cycle test : (a) Amounts of adsorption on toluene and MEK (b) Amounts of desorption on toluene and MEK.

소하였다. Figure 3(c)와 Figure 3(d)는 MEK의 흡착곡선과 탈착곡선을 나타내었다. MEK 단일흡착의 경우, MEK가 150 ~ 200 min까지 배출이 되지 않다가 이후 배출되기 시작하였다. 170 ~ 250 min 이후에는 활성탄에 MEK가 흡착하지 못하여 주입농도와 배출농도가 같아졌다. MEK 단일탈착의 경우, 반응시간이 증가할수록 배출되는 농도가 감소하였다. 반복실험

의 흡착 및 탈착경향은 일치하였다.

Figure 4에 반복실험단계에서 톨루엔과 MEK의 흡착량과 탈착량을 사용된 활성탄의 무게비로 나타내었다. Figure 4(a)에 톨루엔과 MEK의 단일흡착의 각 반복실험별 흡착능을 나타내었다. 두 성분 모두 1회에서 25% 이상의 흡착능을 보였다. 톨루엔의 흡착능은 반복횟수가 증가할수록 감소하는 경

향을 보였다. 반면 MEK의 흡착능은 반복횟수가 증가할수록 톨루엔보다 높은 감소변화를 보였다. 반복실험에서 횟수가 1에서 5회까지 진행하였을 때, MEK의 흡착능이 톨루엔의 흡착능보다 좋았으나 반복 사용으로 인해 MEK의 흡착능이 톨루엔보다 낮아지게 되어 6회 이상부터는 톨루엔보다 낮았다. Figure 4(b)에 톨루엔과 MEK의 단일흡착의 각 반복실험별 탈착능을 나타내었다. 톨루엔의 탈착능은 반복횟수가 증가할수록 감소하는 경향을 보였다. MEK의 탈착능은 반복횟수가 증가할수록 톨루엔보다 높은 감소 경향을 보였다.

흡착능과 탈착능 모두 활성탄과 친화력이 우수한 톨루엔이 MEK보다 우수하였으며, 반복실험을 통한 흡착 및 탈착능의 감소변화도 톨루엔이 MEK보다 낮았다. 톨루엔의 경우, 다른 연구결과[1,14]에서도 볼 수 있듯이 활성탄과 친화력이 높은 방향족 화합물로 높은 흡착 및 탈착능을 나타내었다. MEK의 경우, 케톤류의 휘발성유기화합물은 반응성이 매우 크기 때문에 활성탄에 흡착할 때 발생하는 흡착열이 커서 활성탄의 온도가 증가하여 열화현상을 발생시킨다고 알려져 있다. 열화(deterioration)란 열에 의해 반응이 촉진되어 케톤류가 다른 물질로 전이되어지고 전이되어진 물질들은 활성탄의 기공을 막아 활성탄의 성능을 저하시키는 현상이다. 이러한 현상은 활성탄의 수명을 단축시키기도 한다[15-18]. 따라서 MEK 흡착 및 탈착능은 톨루엔보다 낮았으며, 실험반복횟수가 늘어날수록 감소변화도 크게 나타났다.

Figure 5(a)에서 보는 바와 같이 각 반복실험단계의 흡착량과 탈착량의 비를 비교하면 톨루엔은 감소하는 반면, MEK는 1~5회 실험까지는 감소하나 6회 실험부터는 흡착량보다 탈착량이 많았다. 6회 이후의 탈착률은 활성화 침입효과(activated entry effect) 때문인 것으로 판단된다. 활성화 침입효과는 미세기공을 함유하는 흡착제의 세공 중 좁은 부분이 있고, 그 부분에서 흡착질의 출입이 자유롭지 못하게 되는 현상이다[19].

Figure 5(b)에 톨루엔과 MEK의 단일흡착의 각 반복실험별 회수율을 나타내었다. Equation (2)와 같이 회수율(recovery)은 초기의 흡착된 가스의 질량(q_{a_1})과 각 단계별 탈착된 가스의 질량(q_{d_n})을 비로 나타내었다.

$$Re = \frac{q_{d_n}}{q_{a_1}} \times 100 \quad (2)$$

톨루엔과 MEK의 회수율은 반복횟수가 증가할수록 감소하였다. 톨루엔의 경우 약 90% 이상의 높은 회수율을 보이거나 MEK의 회수율은 10회 반복실험 후 60%로 급격히 줄어들었다. 이와 같은 이유는 활성탄의 세공은 상당량의 물질을 수용하는 저장소의 역할을 하여 MEK도 활성탄의 세공에 상당량이 저장된 것으로 판단된다.

단일성분의 흡착 및 탈착실험에서 톨루엔의 경우, 활성탄과 친화력이 우수하여 높은 흡착 및 탈착능을 보였고, 90% 이상의 높은 회수율을 나타내었다. MEK의 경우, 상대적으로 활성탄과 친화력이 낮아 톨루엔보다 흡착 및 탈착능이 낮아지고, 활성화 침입효과로 탈착률이 낮아졌다가 일정해진 것으로 판단되며 이에 따라 회수율도 낮아지는 것을 알 수 있었다.

3.4. 이성분계 흡착 및 탈착 특성

Figure 6에 이성분계(톨루엔-MEK)의 반복 흡착 및 탈착실험의 반응시간에 따른 농도변화를 나타내었다. Figure 6(a)에 이성분계의 반복흡착곡선을 나타내었다. 이성분계의 톨루엔 흡착곡선은 단일성분과 비슷한 경향을 보였다. 200~300 min에서의 배출되지 않다가 이후 배출되었다. 반면 이성분계의 MEK 흡착곡선은 단일성분과 다른 경향을 보이며, 단일흡착일 경우보다 MEK가 배출되는 시간이 짧았다. 시간이 증가할수록 배출농도가 증가하였으며, 주입농도보다 높은 배출농도를 나타냈다. 이후 배출농도는 주입농도로 감소하면서 안정화되는 경쟁흡착의 전형적인 모습을 보였다.

경쟁흡착은 이성분계 이상의 다성분계 흡착에서 흡착제와 친화력이 높은 물질이 먼저 흡착점을 점유하고 이미 흡착된 낮은 친화력을 갖는 물질을 치환해서 탈착하게 된다. 이러한 이유로 낮은 친화력을 갖는 물질은 주입농도보다 배출농도가 높게 된다. 따라서 각각의 이성분계 흡착에서 친화력이 낮은 물질이 먼저 파과되고 결과적으로 주입 농도보다 높은 농도로 탈착되는 것을 알 수 있다[1,19-22]. 활성탄과 친화력이 상

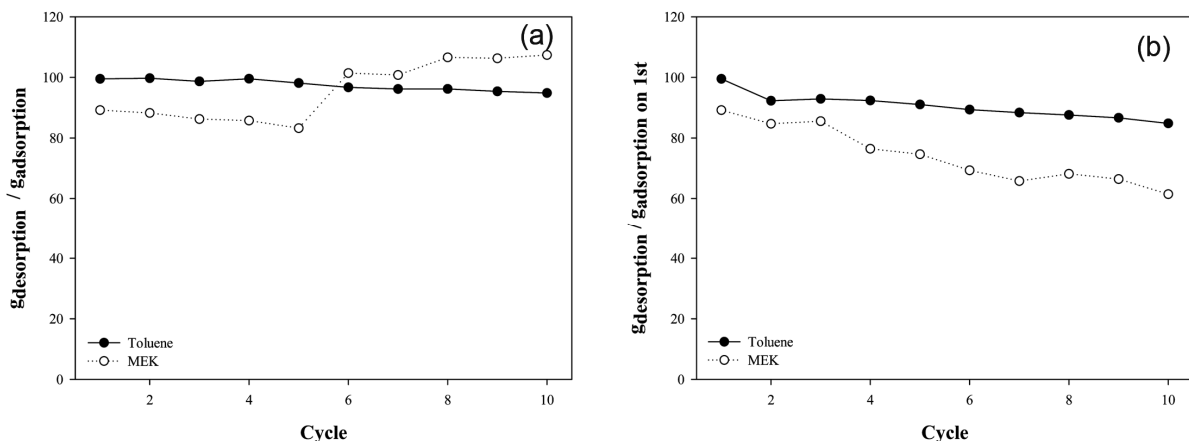


Figure 5. Characteristics of toluene - MEK cyclic test : (a) Rate of amounts of adsorption and desorption (b) Recovery.

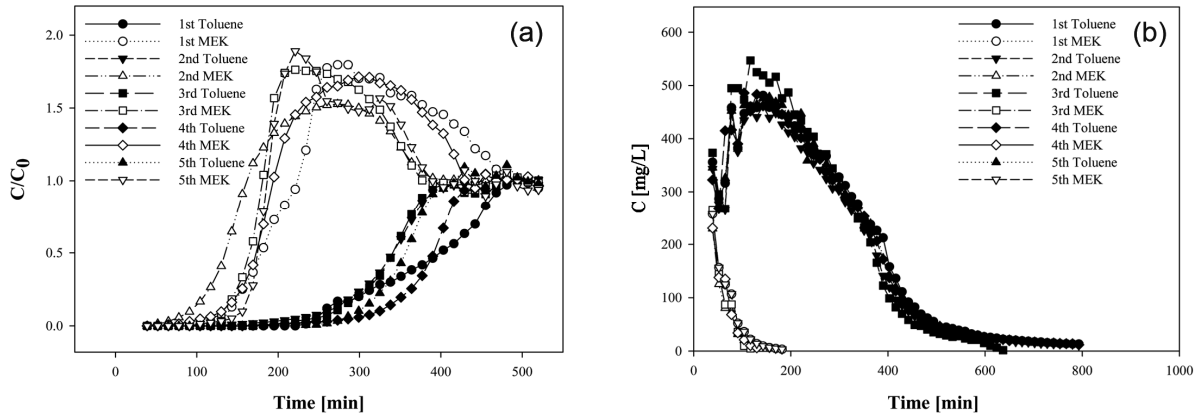


Figure 6. Concentration of adsorption and desorption for binary-components (toluene-MEK) : (a) Adsorption (b) Desorption.

대적으로 낮은 MEK가 톨루엔에 의해 치환 탈착되어, 초기농도보다 약 2배 정도 농축되어 배출되는 현상을 나타냈으며, 평형에 도달 시 흡착량을 비교하면 톨루엔 대비 MEK는 9%에 미치는 소량이였다.

Figure 6(b)에 이성분계의 반복탈착곡선을 나타내었다. 이

성분계 탈착반응에서 톨루엔의 탈착곡선은 단일성분과 같은 경향을 보였다. 그러나 MEK의 탈착곡선은 단일성분과 다르게 더 빠르게 탈착이 완료되었다.

Figure 7에 톨루엔과 MEK의 이성분계의 각 반복실험단계에서 흡착량과 탈착량을 사용된 활성탄의 무게비로 나타내었

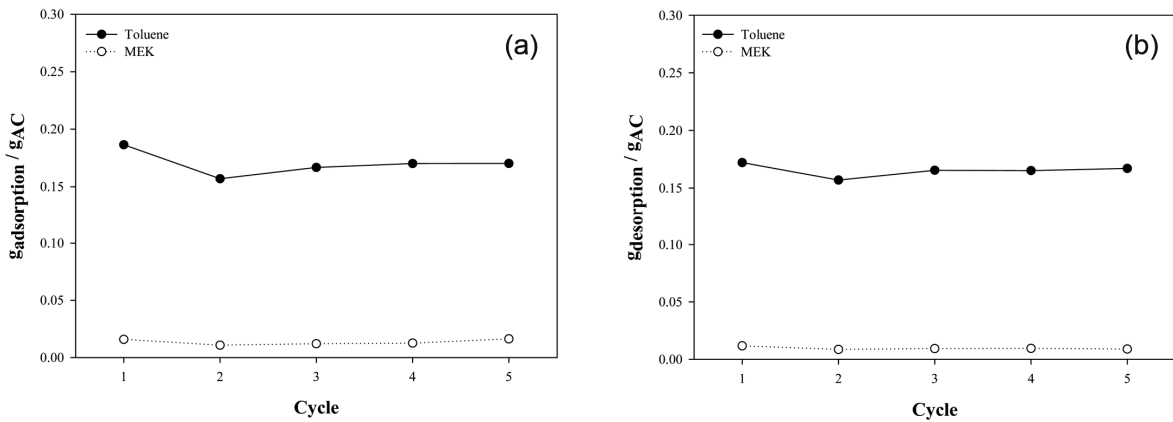


Figure 7. Amounts of adsorption and desorption for binary-components (toluene-MEK) : (a) Amounts of adsorption (b) Amounts of desorption.

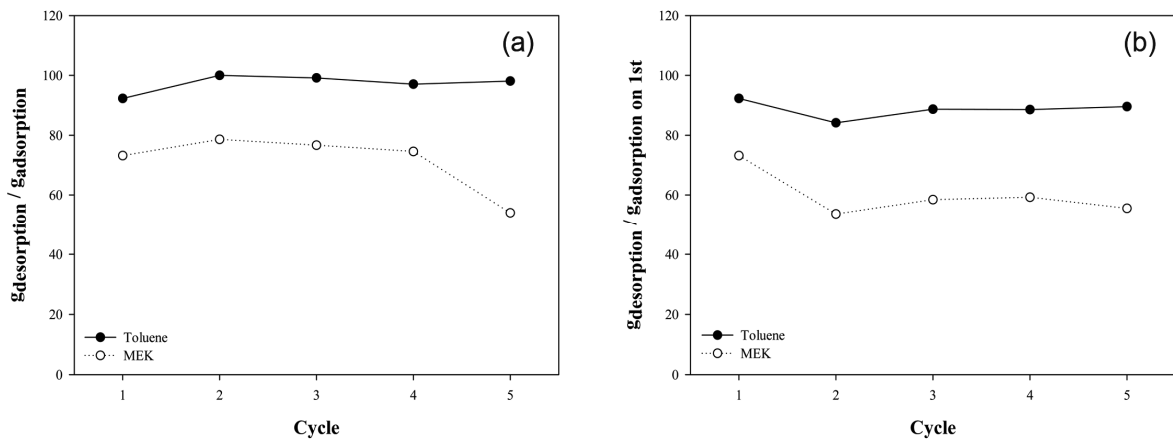


Figure 8. Characteristics of toluene-MEK cyclic test : (a) Rate of amounts of adsorption and desorption (b) Recovery.

다. Figure 7(a)에 이성분계의 흡착능을 나타내었다. 평균적으로 톨루엔의 경우 17%, MEK의 경우 1%의 흡착능을 보이며, 초기보다 감소하는 경향을 보였다. Figure 7(b)은 톨루엔과 MEK의 이성분계의 각 반복실험별 탈착능을 나타내었다. 평균적으로 톨루엔의 경우 16%, MEK의 경우 1%의 탈착능을 보이며, 초기보다 감소하는 경향을 보였다. 이성분계의 흡착 및 탈착능은 반복횟수가 증가할수록 낮아졌다.

Figure 8에 이성분계의 각 반복실험단계에서의 특징을 나타내었다. Figure 8(a)에서 보는 바와 같이 이성분계에서 각 반복실험단계의 흡착량과 탈착량의 비는 톨루엔의 경우 단일성분과 같은 경향을 보이며, 90%의 높은 효율을 보였다. 반면 MEK의 경우 70%에서 50%까지 감소하였다. Figure 8(b)에 이성분계의 각 반복실험 별 회수율을 나타내었다. 단일성분과 같이 톨루엔의 경우 약 90% 이상의 높은 회수율을 보이나 MEK의 회수율은 10회 반복실험 후 60%로 급격히 감소하였다.

이성분계의 흡착 및 탈착반복시험을 통해 활성탄과 두 성분의 친화력차이로 인한 경쟁흡착이 관찰되었으며, 친화력이 상대적으로 낮은 MEK의 흡착 및 탈착능은 초기보다 낮아졌다. 또한, 반복횟수가 증가할수록 흡착 및 탈착능, 탈착률, 회수율 모두 감소하는 경향을 나타내었다.

4. 결론

산업공정에서 널리 사용되는 휘발성 유기화합물 중 톨루엔, MEK, 이성분계(톨루엔-MEK)를 대상으로 흡착 및 탈착특성을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

상온에서 흡착된 휘발성 유기화합물은 각 성분의 끓는점 이상에서 모두 탈착되었다. 단일성분의 흡착 및 탈착반복실험에서 활성탄과 친화력이 우수한 톨루엔이 MEK보다 높은 흡착 및 탈착성능을 보였다. 톨루엔과 MEK 이성분계의 흡착 및 탈착반복시험에서 활성탄과의 친화력차이로 인한 경쟁흡착이 관찰되었으며, 이로 인해 활성탄과의 친화력이 상대적으로 낮은 MEK의 흡착 및 탈착능이 초기보다 낮아졌다.

감사

이 연구는 2015 충남대학교 학술연구비에 의해 지원되었음.

References

1. Cho, J. H., "Activated Carbon Adsorption Characteristics of Multi-Component Volatile Organic Compounds in a Fixed Bed Adsorption Bed," *Korean Chem. Eng. Res.*, **54**(2), 239-247 (2016).
2. Jeong, S. J., Lee, D. L., Kim, T. Y., Kim, J. H., Kim, S. J., and Cho, S. Y., "The Effect of Residual Water on the Adsorption Process of Carbon Tetrachloride by Activated Carbon Pellet," *Korean Chem. Eng. Res.*, **40**, 694-702 (2002).
3. Lee, H. U., Kim, J. S., Han, C., Song, H. K., and Na, B. K., "Adsorption and Desorption Characteristics of MEK with Activated Carbon and Polymer Adsorbents," *Korean Chem. Eng. Res.*, **29**, 120-125 (1999).
4. Rhee, Y. W., "Investigation on Recovery of Energy Resources from Waste Activated Carbons Generated in VOCs Adsorption Towers of Shihwa/Banwal Industrial Complex," Siheung Environmental Technology Development Center, Korea(2009).
5. Rhee, Y. W., "Efficiency Evaluation of Activated Carbon Beds Operated on Shihwa/Banwal Industrial Complex," Siheung Environmental Technology Development Center, Korea(2007).
6. Rhee, Y. W., "Verification on Efficiency of Prevention Facility to Atmospheric Improvement Fund for Study of Representative Material Selection," Siheung Environmental Technology Development Center, Korea(2013).
7. Woo, M. T., "Economic Evaluation Granular Activated Carbon On the Regeneration Cycle," Master Dissertation, Seoul National University of Science And Technology, Korea(2016).
8. Lim, J. K., Lee, S. W., Kam, S. K., Lee, D. W., and Lee, M. G., "Adsorption Characteristics of Toluene Vapor in Fixed-bed Activated Carbon Column," *J. Environ. Sci. Intern.*, **14**, 977-983 (2003).
9. Kwon, J. H., "Adsorption and Desorption Characteristics of VOCs on Activated Carbon according to Pore Areas," *J. Environ. Sci. Intern.*, **14**(2), (2005).
10. Allen, T., Particle Size Measurements, 4th ed., Chapman & Hall, London, 547-628 (1990).
11. Seo, M. C., "Design and Application of Air Pollution Control System Using Activated Carbon Adsorption at Discontinuous VOC Sources," Master Dissertation, Korea Polytechnic University(2006).
12. Chiang, Y. C., Chiang, P. C., and Huang C. P., "Effects of Pore Structure and Temperature on VOC Adsorption on Activated Carbon," *Carbon*, **39**, 523-534 (2001).
13. Allen, T., "Particle Size Measurements," *Chamoman & Hall*, **4**, London, 547-628 (1990).
14. Kim, H. S., Chang, H. S., Park, B. B., Park, Y. S., and Min, B. M., "Adsorption Characteristics of Aromatic Volatile Organic Compounds on Adsorbents," *J. Environ. Sci Intern.*, **21**, 481-488 (1999).
15. Park, E. H., "Adsorption Equilibrium of Toluene, MEK, Cyclohexanone and Water on Activated Carbon and Polymeric Adsorbent," *Theories and Applicat. Chem. Eng.*, **8**(2), (2002).
16. Kwang, J. W., "Adsorption Characteristics of Multi-component VOCs Including Poorly Adsorbable Chemicals on Activated Carbonaceous Adsorbents" *Korean Chem. Eng. Res.*, **45**(3), 277-285 (2007).
17. Ryu, Y. K, Rho, D. S., and Lee, C. H., "Desorption Characteristics of MEK and Toluene from Activated Carbon Fiber by Supercritical Carbon Dioxide," *Hwahak Konghak*, **36**(1), 56 (1998).

18. Park, J. T., Gaseous Adsorption Properties of n-Hexane, Methyl ethyl ketone and Toluene on Granular Activated Carbon,” *Hwahak Konghak*, **32**(3), 476(1994).
19. Yu, J. H., Activated carbon, *Donghwa Co. in Korea*, **2**(2005)
20. Kim, H. S., and Park, Y. S., “Binary Component Adsorption Characteristics of Benzene and Toluene at the Fixed Bed Adsorption Column with Activated Carbon,” *J. Environ. Sci. Intern.*, **25**, 977-983 (2003).
21. Kapoor, A., and Yang, R. T., “Roll-up in Fixed-Bed, Multicomponent Adsorption Under Pore-Diffusion Limitation,” *AIChE J.*, **33**, 1215-1217 (1987).
22. Tefera, D. T., Hashisho, Z., Philips, J. H., Anderson, J. E., and Nichols, M., “Modeling Competitive Adsorption of Mixtures of Volatile Organic Compounds in a Fixed-Bed of Beaded Activated Carbon,” *Environ. Sci. Technol.*, **48**, 5108-5117 (2014).