

고정층 흡착탑에서 다성분 휘발성 유기화합물의 활성탄 흡착 특성

조종훈 · 이시훈*·† · 이영우†

충남대학교 에너지과학기술대학원
34134 대전광역시 유성구 대학로 99
*한국에너지기술연구원
34129 대전광역시 유성구 가정로 152

(2015년 7월 14일 접수, 2015년 9월 18일 수정본 접수, 2015년 10월 1일 채택)

Activated Carbon Adsorption Characteristics of Multi-component Volatile Organic compounds in a Fixed Bed Adsorption Bed

Jong Hoon Cho, Sihyun Lee*·† and Young Woo Rhee†

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

*Korea Institute of Energy Research, 152, Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34129, Korea

(Received 14 July 2015; Received in revised form 18 September 2015; accepted 1 October 2015)

요 약

본 연구에서는 상용활성탄 4가지를 사용하여 산업공정에서 사용빈도가 높은 톨루엔, isopropyl alcohol (IPA), ethyl acetate (EA), 3성분계를 대상으로 흡착특성을 고찰하였다. 고찰결과 3가지 휘발성 유기화합물 중 활성탄과 가장 친화력이 낮은 IPA의 파괴점이 가장 짧았으며 다음으로 EA, 톨루엔 순으로 파괴점이 길어지는 것을 알 수 있었다. 가장 파괴점이 짧은 IPA를 기준으로 단일성분, 2성분, 3성분계의 파괴점 변화를 고찰한 결과 성분 수가 많아질수록 파괴점이 낮아지는 것을 알 수 있었으며 이는 친화력이 낮은 물질이 친화력이 높은 물질에 의해 치환되는 경쟁흡착에 의한 것을 알 수 있었다. 따라서 톨루엔-IPA-EA 3성분계 흡착에서는 IPA의 파괴를 기준으로 흡착탑을 설계하여야 하며 실제 산업체에서 흡착탑을 설계하는 기준도 가장 친화력이 낮은 물질을 기준으로 하여야 함을 알 수 있었다.

Abstract – This study aims to examine absorption characteristics of toluene, isopropyl alcohol (IPA), ethyl acetate (EA), and ternary-compounds, all of which are widely used in industrial processes, by means of four types of commercial activated carbon substances. It turned out that among the three types of volatile organic compounds, the breakthrough point of activated carbon and that of IPA, whose affinity was the lowest, were the lowest, and then that of EA and that of toluene in the order. With the breakthrough point of IPA, which was the shortest, as the standard, changes in the breakthrough points of unary-compounds, binary-compounds, and ternary-compounds were examined. As a result, it turned out that the larger the number of elements, the lower the breakthrough point. This resulted from competitive adsorption, that is, substitution of substances with a low level of affinity with those with a high level of affinity. Hence, the adsorption of toluene-IPA-EA and ternary-compounds require a design of the activated carbon bed based on the breakthrough of IPA, and in the design of activated carbon beds in actual industries as well, a substance whose level of affinity is the lowest needs to be the standard.

Key words: Volatile Organic Compounds, Adsorption, Competitive Adsorption, Breakthrough Curves

1. 서 론

휘발성 유기화합물(VOCs; volatile organic compounds)은 증기압이 높아 대기 중에 쉽게 증발하는 탄화수소화합물의 총칭으로 방

향족 탄화수소와 지방족 탄화수소와 같이 탄소와 수소 원소만으로 이루어진 일반 탄화수소와 질소, 산소 및 할로젠 원소를 포함하는 비균질 탄화수소로 나뉜다[1,2].

휘발성 유기화합물은 악취를 발생시켜 작업현장의 환경을 해칠 뿐만 아니라, 대기 중에서 태양에너지를 받아 질소화합물과 함께 오존을 만들어 광화학스모그 형성의 전구체 역할을 함으로써 인체에 악영향을 미친다[3].

휘발성 유기화합물은 대부분의 화학 및 제약공장, 용매와 세정제를 사용하는 산업공정에서 배출되고 있으며, 이 중에서도 도장 및 인

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: ywrhee@cnu.ac.kr, LSH3452@kier.re.kr

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.

쇄공정, 플라스틱 관련 공정, 유기화합물 제조공정 등에서 THC (total hydrocarbon) 기준으로 300~10,000 ppm 범위의 비교적 많은 양이 배출되고 있다.

국내외에서 주로 사용되고 있는 휘발성 유기화합물은 크게 방향족과 알코올류로 나눌 수 있는데, 방향족의 대표적 화합물인 톨루엔과 알코올류인 IPA (isopropyl alcohol)의 이용 빈도가 높다.

휘발성 유기화합물에 지속해서 노출되는 산업현장의 근로자들은 피부접촉이나 호흡기 흡입을 통해 신경계 장애를 일으키거나 다량으로 함유된 발암물질 때문에 인체에 매우 유해한 영향을 받게 된다[4]. 따라서 휘발성 유기화합물을 효과적으로 처리하기 위한 공정개선 및 처리기술이 필요하다 하겠다.

휘발성 유기화합물의 처리기술은 크게 제거와 회수의 두 가지로 나눌 수 있는데, 제거기술에는 농축 소각과 열 산화, 촉매 산화법이 있고 회수기술로는 농축에 의한 응축법이 있다. 이러한 처리 방법들은 휘발성 유기화합물을 포함한 기체의 풍량과 농도에 따라 적용기술이 달라지기 때문에 적용하고자 하는 공정을 면밀하게 분석하여야 한다[5]. 특히, 국내의 휘발성 유기화합물을 배출하는 산업현장의 경우 정확한 배출량이 파악되지 않은 상태이므로 배출유량 및 농도에 대해서 폭넓게 적용할 수 있는 처리기술이 필요하다.

실제 산업현장에서 가장 많이 응용되고 있는 처리기술은 운전 및 관리가 용이하고 비교적 효율이 높은 활성탄소 흡착이다[6-8]. 한편, 휘발성 유기화합물 배출 공정에서는 일반적으로 혼합물질 형태로 배출되는데, 활성탄소를 사용한 흡착공정 연구는 톨루엔 단일성분에 관한 것이 대부분이다[9-12]. 다성분계에 대한 연구라고 하더라도 활성탄소가 우수한 흡착성능을 보이는 방향족 탄화수소인 BTX (benzene toluene xylene)에 관한 것으로[13-16], 낮은 흡착성능을 보이는 알코올류를 포함한 다성분계 흡착연구는 저조한 실정이다. 특히, 다성분계 흡착공정은 성분 간의 경쟁과 상호작용을 고려하여야 하므로 흡착특성을 해석하는 데 어려움이 있다.

실제 산업현장에서 휘발성 유기화합물 흡착공정을 설계하는 데 있어서 다성분계의 흡착 특성연구는 반드시 선행되어야 할 과제라 할 수 있다. 환경오염물질인 휘발성 유기화합물을 제어하기 위한 활성탄 흡착탑 설계는 과과점이 기준이 된다. 국내 산업단지의 활성탄 흡착탑 설계는 가장 사용량이 많은 톨루엔을 기준으로 하고 있다. 그러나 산업체 배출 휘발성 유기화합물은 다성분계가 대부분이어서 실제로 다성분계 흡착 시 과과특성을 고찰할 필요가 있다.

본 연구에서는 상용 활성탄의 의한 다성분계 휘발성 유기화합물의 경쟁흡착특성을 고찰하였다. 다성분계 휘발성 유기화합물의 구성에는 방향족 탄화수소의 대표적 물질인 톨루엔과, 알코올류 중에서 산업현장에서 많이 사용되는 IPA, 그리고 역시 현장에서 사용빈도가 높은 EA (ethyl acetate)를 포함하였다.

2. 실험방법

2-1. 실험재료

본 실험에서 사용한 활성탄은 상용 활성탄이며, 사용하기 전 수분제거를 위해 100 °C에서 24시간 건조하여 사용하였다. 4가지 활성탄에 대한 물리적 특성을 Table 1에 나타내었으며, 흡착특성을 Fig. 1에 나타냈다. 본 연구에서 사용한 4가지 상용 활성탄은 각각 Norit activated carbon, Calgon Carbon Corporation, 중국의 상용 활성탄 제조업체 2곳으로부터 구매하였으며 BET 비표면적 순서로

Table 1. Physical properties and Iodine value of activated carbon

	A	B	C	D
Specific surface area (m ² g ⁻¹)	1370	1214	1131	937
Total pore volume (cm ³ g ⁻¹)	0.689	0.637	0.570	0.458
Average pore diameter (nm)	2.16	2.68	2.57	2.43

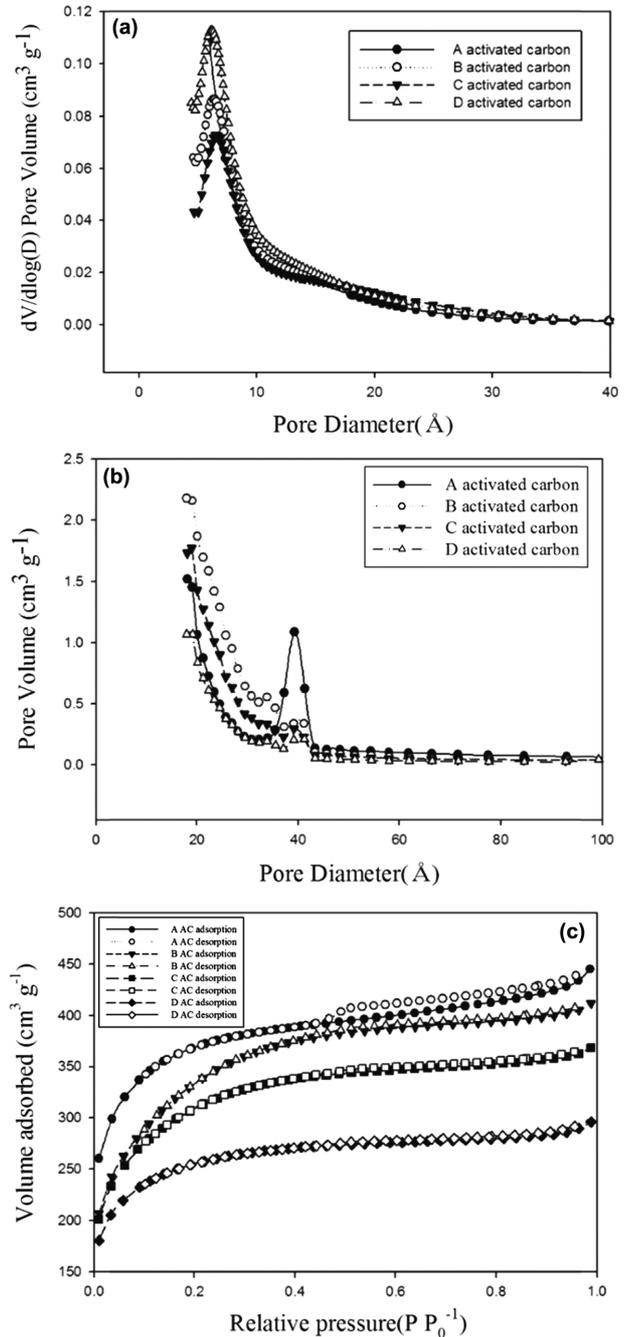


Fig. 1. BJH and HK pore size distribution and Adsorption / desorption N₂ isotherm of activated carbon: (a) HK pore size distribution of activated carbon, (b) BJH pore size distribution of activated carbon, and (c) Adsorption / desorption N₂ isotherm of activated carbon.

A, B, C, D로 나타내었다. Table 1에서 보면 비표면적은 활성탄 D를 제외한 나머지 활성탄들은 1000 m² g⁻¹ 이상의 고품질 활성탄인 것을

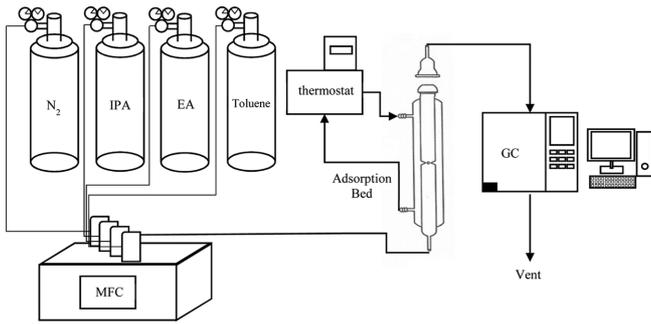


Fig. 2. Schematic diagram of experimental.

알 수 있으며 평균기공크기는 비표면적이 가장 적었던 D가 가장 큰 기공크기를 갖는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 저농도의 휘발성 유기화합물을 사용하기 때문에 미세기공의 부피가 중요한 역할을 할 것으로 판단되므로 미세기공 부피를 Table 1에 같이 나타내었다.

2-2. 실험장치 및 실험방법

Fig. 2에 실험에 사용한 장치를 나타내었다. 사용한 흡착장치는 내경 10 mm, 외경 30 mm, 길이 200 mm의 유리관으로 제작하였으며, 중심 부분에 활성탄을 장착할 수 있도록 하였다. 흡착장치 온도는 항온조를 이용하여 30 °C로 유지하였다. 활성탄 충전량은 활성탄의 충전 높이 20 mm가 되도록 맞췄으며, 이 경우 활성탄의 양은 0.5 g이었다.

본 연구에서는 단일성분 흡착에서는 농도를 1000 ppm으로 맞춰 사용하였고, 3성분 흡착에서는 현장에 주요 사용되는 비율인 톨루엔:IPA:EA를 6:3:1의 비(mol%)로 혼합하여 사용하였으며 전체 농도는 1000 ppm이 되도록 조절하였다. 각 물질의 2성분 흡착특성을 고찰하기 위하여 톨루엔:EA를 6:1, 톨루엔:IPA를 6:3, EA:IPA를 1:3의 비(mol%)로 혼합하여 총 1000 ppm이 되도록 조절하였다. 각 휘발성 유기화합물은 농도를 1000 ppm으로 맞춰 표준가스를 제작하여 사용하였으며, 이 표준가스를 이용하여 GC를 검정하였다. 각 휘발성 유기화합물의 농도는 GC (Dong-il Shimadzu Corp., GC-2010 FID)로 측정하였다. 장치로 유입되는 표준가스의 유량은 유량계(MFC; mass flow controller)를 이용하여 150 ml/min으로 정확히 조절하였다. 100 °C에서 건조한 활성탄 0.5 g을 흡착장치에 충전시키고 항온조를 이용해서 30 °C로 유지한 후 질소를 150 ml/min으로 주입하여 전체 시스템을 10분정도 흘려주어 안정화 시켰다. 이후 질소 주입을 중단하고 휘발성 유기화합물을 주입을 하여 흡착 실험을 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 단일성분 휘발성 유기화합물 흡착특성

다성분 흡착특성을 고찰하기 전에 톨루엔, EA, IPA에 대한 단일 성분특성을 고찰하였다. Fig. 3에 4가지 활성탄에 대한 각 물질의 단일성분 파과곡선을 나타내었다. 파과곡선들의 Y축은 흡착질의 유출농도를 유입초기농도에 대하여 무차원화 하여 C/C₀으로 나타내었다. 그리고 파과곡선들의 파과점은 유입농도의 1%인 유출농도가 검출되는 시간으로 정하였다[17,18]. Table 2에 각 활성탄의 각 물

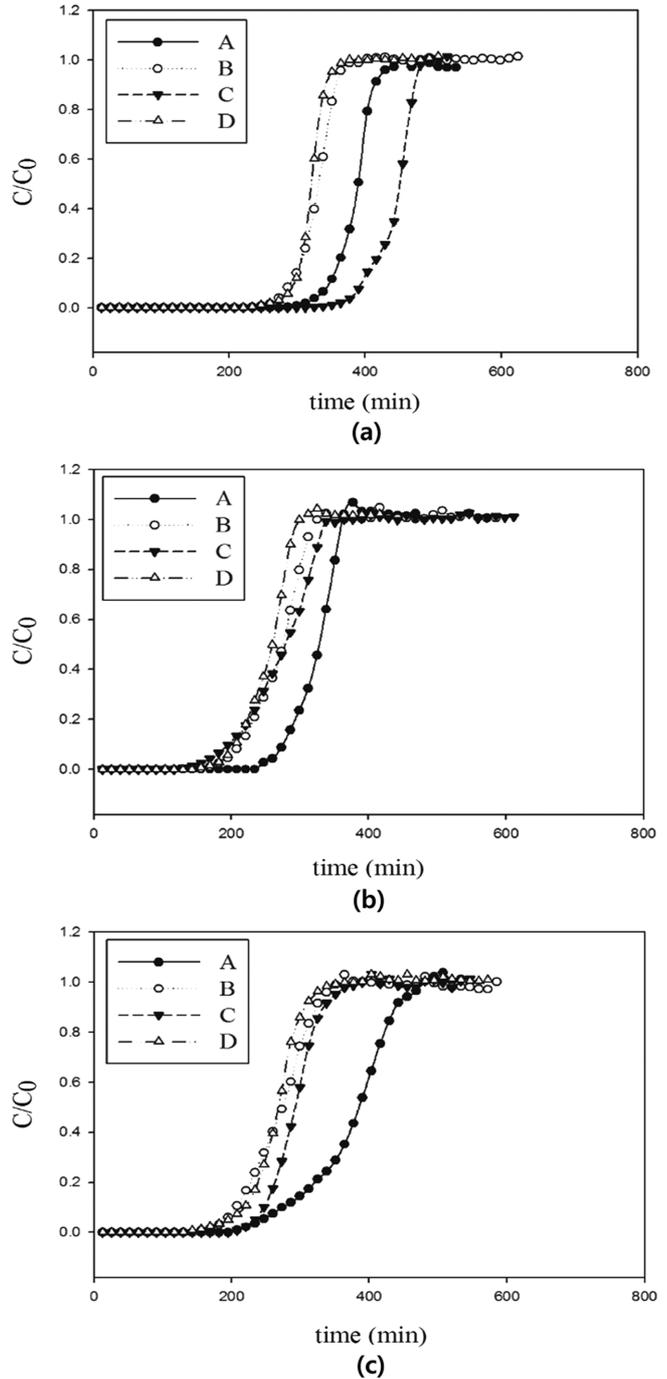


Fig. 3. Breakthrough curves of unary-component VOCs; (a) toluene, (b) EA, and (c) IPA.

질의 대한 파과점을 나타내었다. 참고로 Table 2에 각 활성탄의 각 물질에 대한 흡착량을 같이 나타내었다.

활성탄의 물리적 특성과 흡착현상의 관계를 고찰하기 위하여 Fig. 4에 활성탄의 비표면적과 흡착량과의 관계를 나타내었다. Fig. 4에서 보는 것과 같이 비표면적과 흡착량과의 관계는 EA와 IPA에서는 정확한 것은 아니지만 선형관계를 보이는 것을 알 수 있다. 그러나 톨루엔의 경우에는 특별한 상관관계를 보이지 않고 있으며, 특히 활성탄 C의 경우에 차이가 나는 것을 알 수 있었다. 톨루엔은 다른 2가지 물질 즉, EA와 IPA와 비교해서 분자크기(톨루엔 :

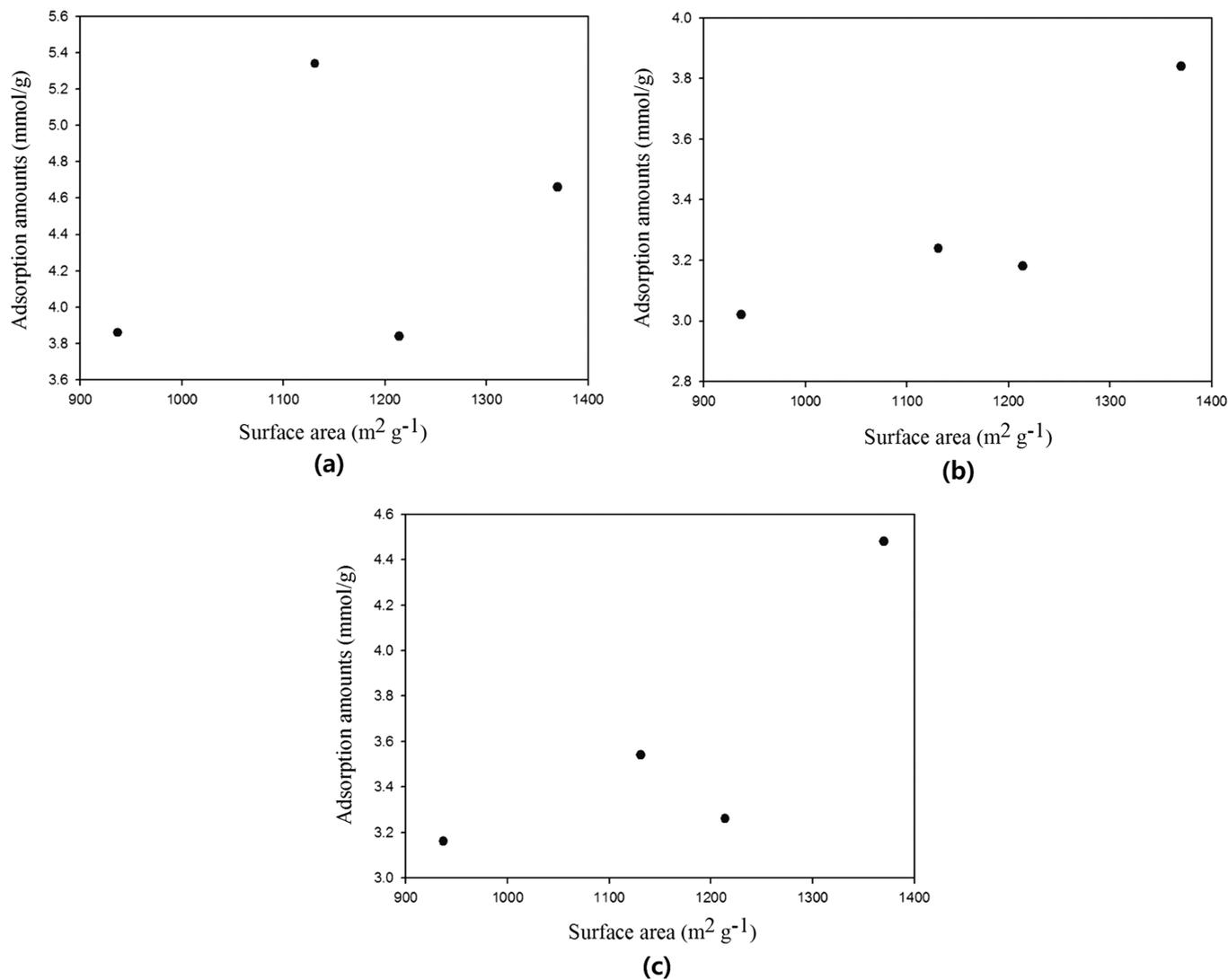


Fig. 4. Relationship between surface area and Adsorption amounts; (a) toluene, (b) EA, and (c) IPA.

Table 2. Amount of unary-component VOCs adsorbed and breakthrough point (1000 ppm)

VOC	A		B		C		D	
	Break-through point (min)	Adsorption amounts (mmol/g _{AC})	Break-through point (min)	Adsorption amounts (mmol/g _{AC})	Break-through point (min)	Adsorption amounts (mmol/g _{AC})	Break-through point (min)	Adsorption amounts (mmol/g _{AC})
Toluene	301	4.66	250	3.94	347	5.34	244	3.86
EA	240	3.84	168	3.18	137	3.24	157	3.02
IPA	209	4.48	158	3.26	208	3.54	149	3.16

Table 3. Amount of binary-component VOCs adsorbed and breakthrough point

VOC		A		B		C		D	
		Break-through point (min)	Adsorption amounts (mmol/g _{AC})	Break-through point (min)	Adsorption amounts (mmol/g _{AC})	Break-through point (min)	Adsorption amounts (mmol/g _{AC})	Break-through point (min)	Adsorption amounts (mmol/g _{AC})
Binary [toluene:EA]	Toluene (857 ppm)	389	5.12	368	4.88	352	4.58	324	4.08
	EA (143 ppm)	332	0.143	277	9.62*10 ⁻²	265	7.72*10 ⁻²	257	8.4*10 ⁻²
Binary [toluene:IPA]	Toluene (667 ppm)	504	4.94	488	4.6	482	4.64	409	4.14
	IPA (333 ppm)	293	0.208	224	9.58*10 ⁻²	226	6.92*10 ⁻²	217	4.7*10 ⁻²
Binary [EA:IPA]	EA (250 ppm)	420	2.96	499	2.20	380	2.08	304	2.04
	IPA (750 ppm)	289	2.16	273	2.14	218	1.82	179	1.65

Table 4. Amount of ternary-component VOCs adsorbed and breakthrough point

VOC	A		B		C		D	
	Break-through point (min)	Adsorption amounts (mmol/g _{AC})	Break-through point (min)	Adsorption amounts (mmol/g _{AC})	Break-through point (min)	Adsorption amounts (mmol/g _{AC})	Break-through point (min)	Adsorption amounts (mmol/g _{AC})
Toluene (600 ppm)	288	3.78	299	4.20	382	4.24	420	3.86
EA (100 ppm)	198	0.125	184	5.5×10^{-2}	237	9.38×10^{-2}	248	7.24×10^{-2}
IPA (300 ppm)	137	9.94×10^{-2}	83	0.116	160	0.119	197	0.107

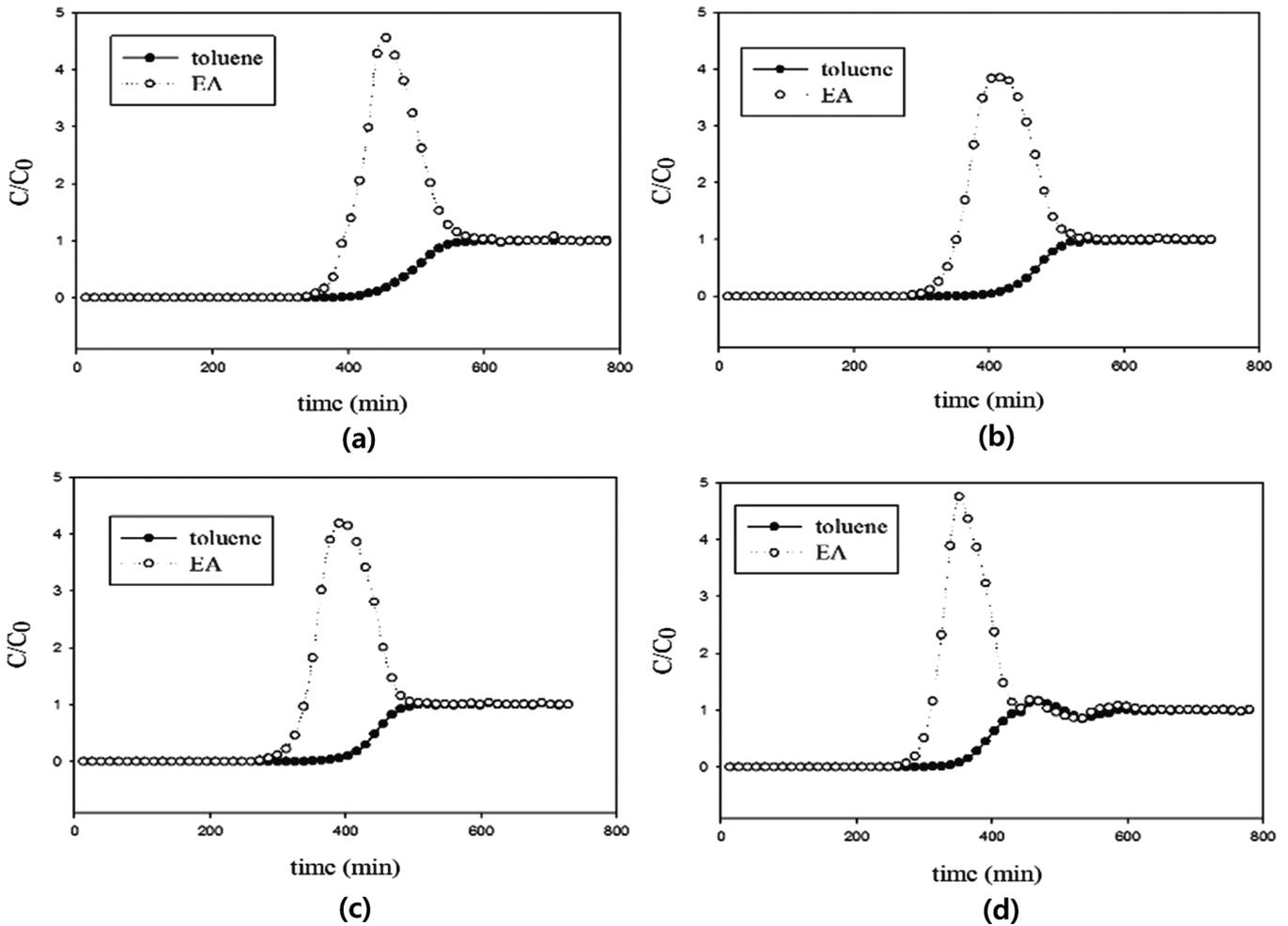


Fig. 5. Breakthrough curves of toluene:EA binary-component VOCs; (a) A AC, (b) B AC, (c) C AC, and (d) D AC.

5.85 Å, EA : 5.2Å, IPA : 4.7Å)가 크고 비극성 물질이어서 활성탄의 물리적 특성과의 상관관계를 도출하기가 어렵다는 것을 알 수 있었다. 이에 대해서는 더 많은 활성탄 종류에 대한 실험과 화학적 특성(기능성 그룹)에 대한 연구가 필요하다고 판단되었다.

Table 2와 Fig. 3, 4에서 보는 것과 같이 파과점은 톨루엔의 경우 244~301 분으로 활성탄 간에 차이가 클 수 있으며, 제일 낮은 파과점을 나타내는 것은 비표적이 적은 활성탄 D인 것을 알 수 있었다. EA와 IPA의 경우는 각각 137~240 분, 149~209 분으로 역시 큰 차이를 보이며 EA의 경우 활성탄 A를 제외한 활성탄 B, C, D가 유사한 경향성을 보이고, IPA의 경우는 파과점에서는 활성탄 A, C가 유사하고 활성탄 B, D가 유사한 것을 알 수 있었다. 흡착량에 있어서는 Fig. 3(c)에서 보듯이 활성탄 A가 파과 후 늘어지는 파과곡

선을 보여, 예상외로 흡착량이 탁월히 높은 것을 알 수 있었다.

3-2. 2성분계 휘발성 유기화합물 흡착특성

Fig. 5~7까지 3가지 물질을 각각 조합을 해서 2성분계 흡착 실험한 결과를 나타내었다. 그림에서 보는 것과 같이 2성분계 흡착 실험 결과 전형적인 경쟁흡착 특성을 나타내서 각각의 2성분계 흡착에서 친화력이 낮은 물질이 먼저 파과되고 결과적으로 주입농도 보다 높은 농도로 탈착되는 것을 알 수 있다.

경쟁흡착은 2성분계 이상의 다성분계 흡착에서 흡착제와 친화력이 높은 물질이 우선적으로 흡착점을 점유하고 이미 흡착되어 있는 낮은 친화력을 갖는 물질을 치환해서 탈착하게 된다. 이러한 이유로 낮은 친화력을 갖는 물질은 주입농도보다 배출농도가 높게 된다[19,20].

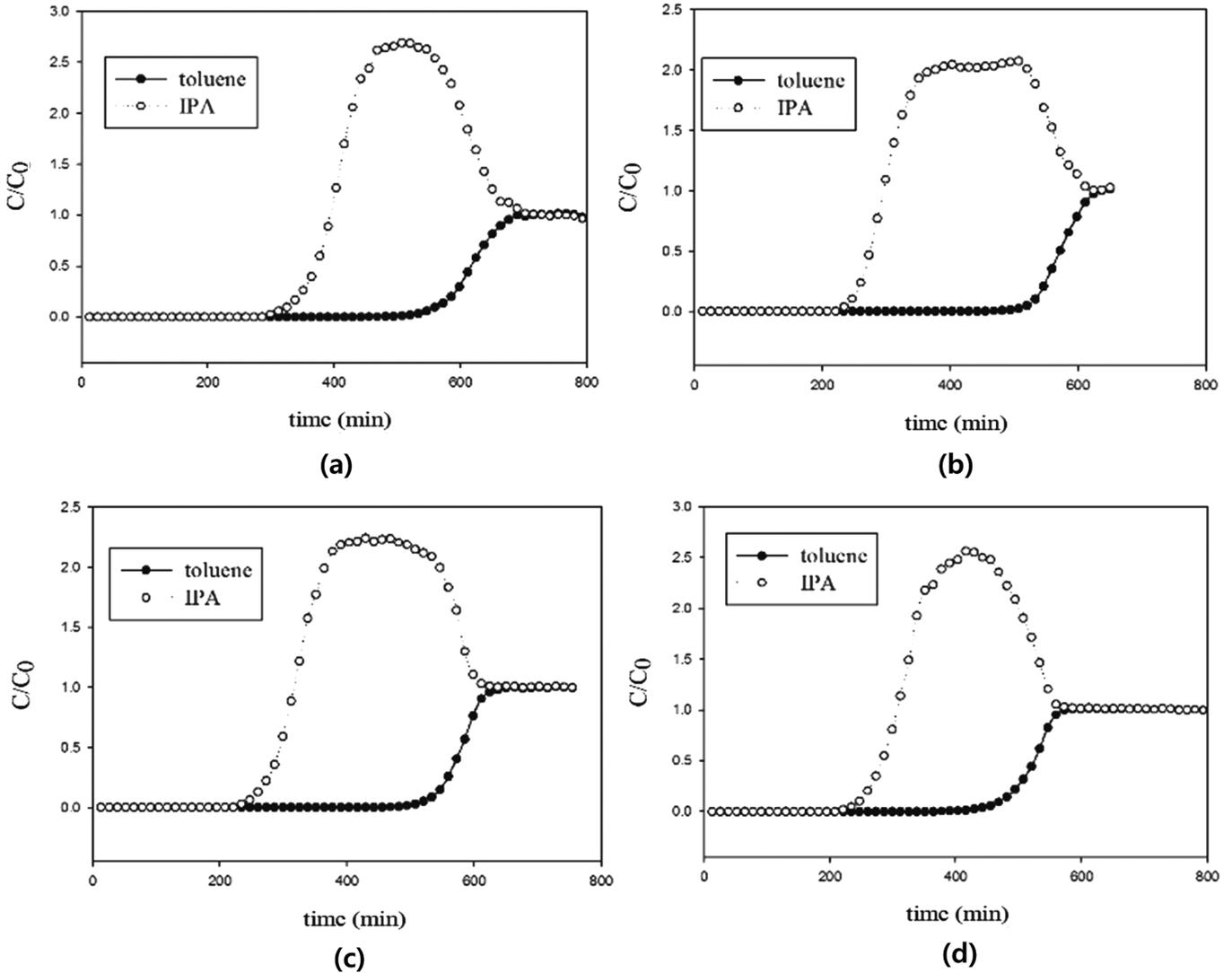


Fig. 6. Breakthrough curves of toluene:IPA binary-component VOCs; (a) A AC, (b) B AC, (c) C AC, and (d) D AC.

Fig. 5와 6의 톨루엔:EA, 톨루엔:IPA에서 보는 것처럼 배출농도에서 차이가 나는 것은 톨루엔의 농도차이 때문이며 예를 들면 Fig. 5의 경우 톨루엔과 EA의 비(mol%)가 6:1으로 톨루엔의 농도가 높아서 치환시키는 물질이 치환되는 물질보다 월등히 높아서 나타나는 현상으로 판단된다.

3-3. 3성분 휘발성 유기화합물 흡착특성

Fig. 8에 3성분계 흡착 실험결과를 나타내었다. 앞에서 기술한 바와 같이 3성분계 휘발성 유기화합물 흡착에서도 전형적인 경쟁흡착 특성을 보임을 알 수 있었다. Fig. 8에서 보는 것 같이 경쟁흡착은 앞서 설명한 2성분계 흡착과는 약간 다른 특성을 보여주고 있는데, 이러한 현상은 2성분계 흡착에서는 높은 친화력을 갖는 물질과 낮은 친화력을 갖는 물질이 각각 하나씩 존재하여 단순히 치환되는 현상만 나타내는 반면에 3성분계 흡착에서는 친화력이 다른 3가지 물질이 같이 혼합되어 있어서, 서로 다른 친화력을 갖는 물질들이 경쟁흡착에 의해 흡착과 치환이 동시에 일어나기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다[20].

4가지 활성탄 중에서 IPA 흡착에 탁월한 성능을 갖는 활성탄 A를 대상으로 농도별 흡착 실험을 진행하여 각 농도별 단일흡착, 2성분계 흡착, 3성분계 흡착에서의 IPA의 과과점 변화를 고찰하였으며, 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다.

IPA 흡착 실험에 사용한 농도는 단일성분의 경우는 1000 ppm, 2성분인 경우는 333 ppm, 3성분인 경우는 300 ppm이므로 IPA 300 ppm 단일성분 실험을 진행하였으며 결과를 Fig. 9에 같이 나타내었다.

Fig. 9에서 보는 것과 같이 IPA 단일성분 흡착에서는 농도가 300 ppm 일 때 554분, 농도가 1000 ppm일 때 209 분이였다. 2성분계흡착 실험인 톨루엔:IPA 흡착 실험 결과 IPA의 농도가 333 ppm인 경우 과과점이 293 분으로 줄어들어서 약 260분 감소함을 알 수 있었다. 3성분계 실험에서는 IPA가 정확히 300 ppm인 경우의 과과점이 137 분으로 줄어들어서 단일성분 흡착 실험결과보다 417분 감소하였고 2성분계 흡착 실험결과보다 156분 감소하였다. 이는 농도가 약 3배 높은 1000 ppm의 경우에 209분보다도 72분이나 짧아진 결과이다. 여기서 알 수 있는 것은 같은 농도라도 하더라도 혼합물질의

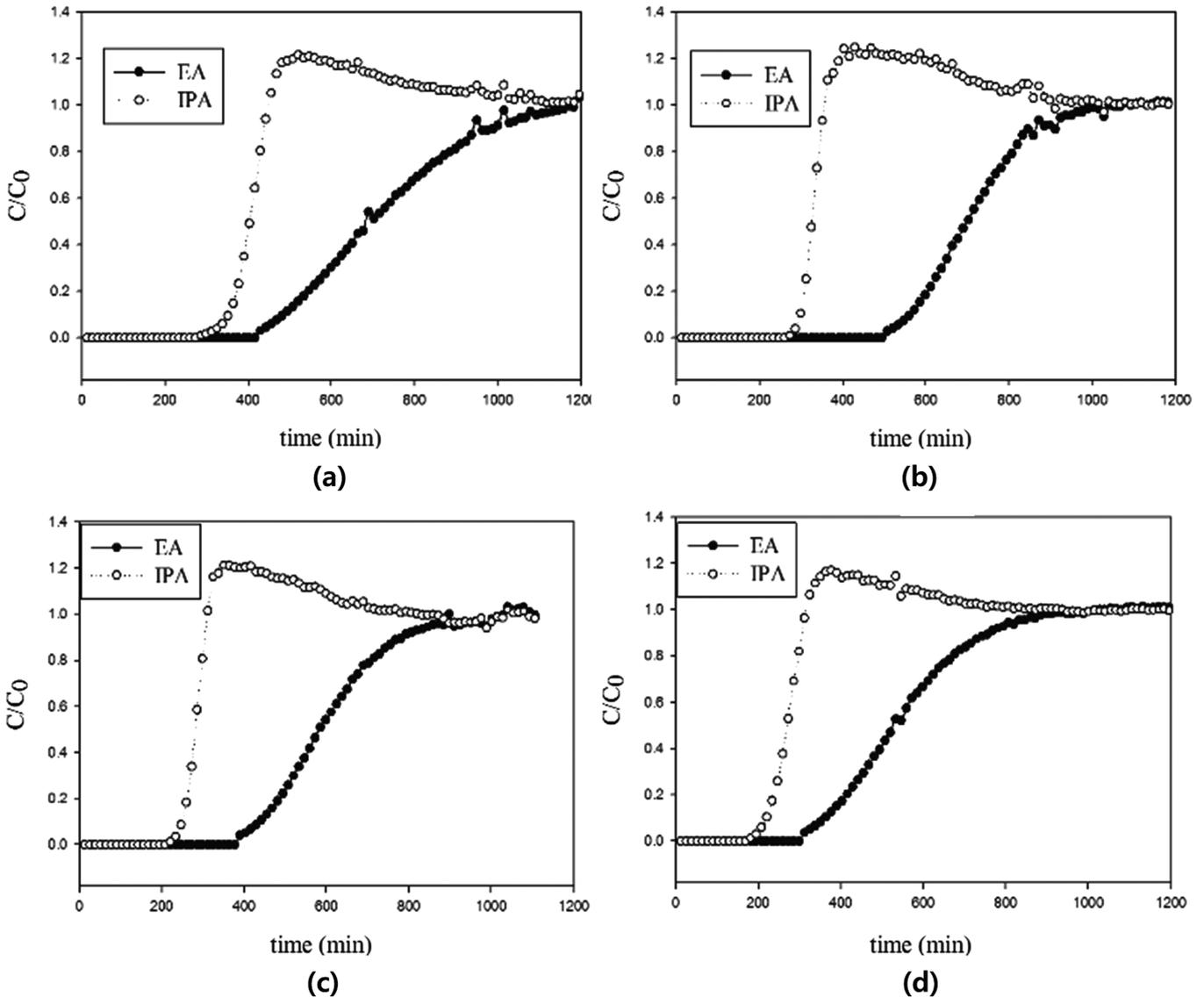


Fig. 7. Breakthrough curves of EA:IPA binary-component VOCs; (a) A AC, (b) B AC, (c) C AC, (d) D AC.

수가 증가 할수록 친화력이 낮은 물질의 파괴점이 경쟁흡착에 의해 짧아지는 것을 의미한다. 따라서 다성분 휘발성 유기화합물 흡착에서는 가장 낮은 친화력을 갖는 물질을 대상으로 파괴점을 측정하고 이를 기준으로 흡착탑을 설계하여야 함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 4가지의 상용 활성탄을 사용하여 톨루엔-IPA-EA의 다성분 휘발성 유기화합물 흡착특성을 살펴보았다. 단일성분 흡착 실험에서는 활성탄소와 친화력이 좋은 톨루엔의 흡착량이 많고 파괴시간 또한 흡착량과 비례하여 증가하였다. 3성분 흡착 실험에서는 경쟁흡착으로 인해 활성탄소와 친화력이 적은 EA와 IPA가 흡착 되었다가 전량이 배출되는 것을 확인하였다. 하지만 친화력이 유사한 EA와 IPA의 2성분 흡착 실험에서는 경쟁흡착으로 완전히 배출되기 보다는 EA와 IPA가 같이 흡착이 되어 공존하는 것을 확인하였다.

4가지 활성탄 중에서 IPA 흡착에 탁월한 성능을 갖는 활성탄 A를 대상으로 농도별 흡착 실험을 진행하여 각 농도별 단일흡착, 2성분 흡착, 3성분 흡착에서의 IPA의 파괴점 변화를 고찰하였다. 고찰결과 IPA 단일성분 흡착에서는 농도 300 ppm일 때 파괴점이 554분, 농도가 1000 ppm일 때 209분으로 나타났다. 2성분 흡착 실험인 톨루엔:IPA 흡착 실험 결과 IPA의 농도가 333 ppm인 경우 파괴점이 293분으로 줄어들었으며 3성분 실험에서는 IPA가 농도가 300 ppm인 경우 파괴점이 137분으로 줄어들었다. 즉, 같은 농도라도 하더라도 혼합물질의 수가 증가 할수록 친화력이 낮은 물질의 파괴점이 경쟁흡착에 의해 짧아지는 것을 의미한다.

실제 활성탄 흡착탑은 휘발성 유기화합물이 배출을 억제하기 위해 주기적으로 활성탄을 교체해주고 있지만 활성탄의 교체 시기가 톨루엔을 기준으로 정해진 것이어서 적절히 되지 않고 있다. 따라서 적절한 교체 시기의 결정은 단일성분보다 다성분 흡착 실험의 파괴점으로 판단하여야 함을 알 수 있었다.

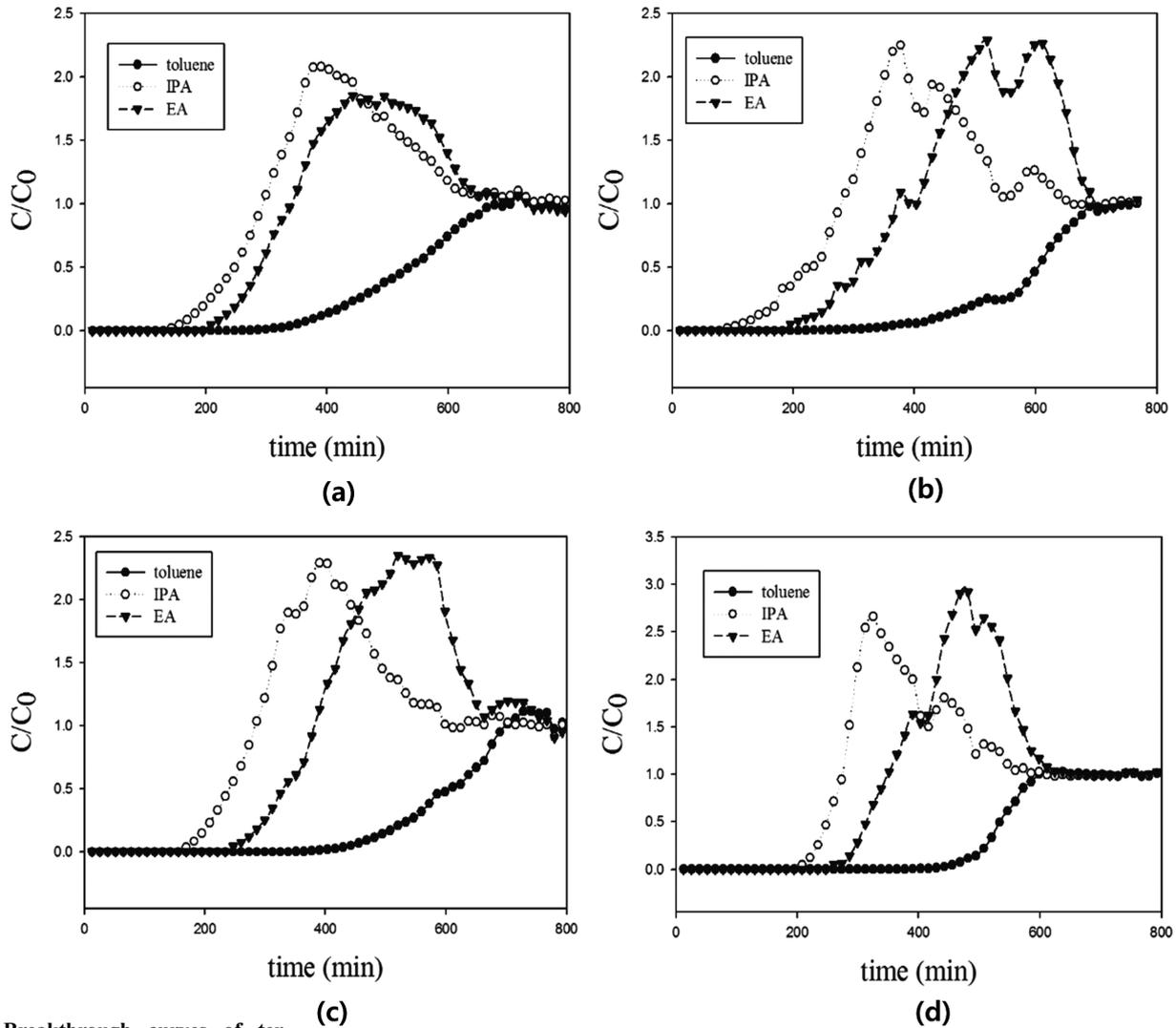


Fig. 8. Breakthrough curves of ternary-component VOCs; (a) A AC, (b) B AC, (c) C AC, (d) D AC.

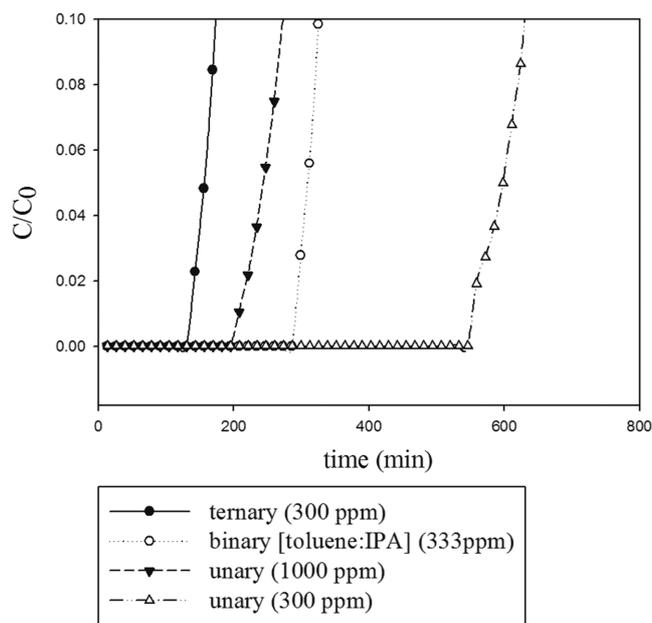


Fig. 9. IPA breakthrough curves of A activated carbon.

References

1. 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," *HWAHAK KONGHAK*, **40**(6), 694-702(2002).
2. Kang, S. C., Lee, H. Y. and Park, Y. H., "A Study on Dealumination of NaY Zeolite and its VOCs Adsorption Properties," *Korean Chem. Eng. Res.*, **53**(3), 339-349(2015).
3. Kim, S. S., Lee, C. H. and Park, S. W., "Adsorption Analysis of VOCs of Zeolite Synthesized by Coal Fly Ash in a Fixed-bed Adsorber," *Korean Chem. Eng. Res.*, **48**(6), 754-790(2010).
4. Hwang, K. S., Choi, D. K. and Gong, S. Y., "The Thermal Regeneration Characteristics of Volatile Organic Compounds on Activated Carbon Bed(I): Adsorption Step," *HWAHAK KONGHAK*, **36**(2), 159-168(1998).
5. 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," *HWAHAK KONGHAK*, **29**(6), 120-125(1999).

6. 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).
7. Rhee, Y. W., "Efficiency Evaluation of Activated Carbon Beds Operated on Shihwa/Banwal Industrial Complex," Siheung Environmental Technology Development Center, Korea (2007).
8. 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).
9. Lim, J. K., Lee, Lee, S. W., Kam, S. K., Lee, D. W. and Lee, M. G., "Adsorption Characteristics of Toluene Vapor in Fixed-bed Activated Carbon Column," *KENSS*, **14**(1), 977-983(2003).
10. Chun, D. Y., Cho, Y. S., Kim, Y. J. and Yoa, S. J., "Adsorption Characteristics of Toluene on Activated Carbon in a Packed Bed with Stratification," *KSSE*, **24**(4), 665-673(2002).
11. Kim, H. S. and Park, Y. S., "Binary Component Adsorption Characteristics of Benzene and Toluene at the fixed Bed Adsorption Column with Activated Carbon," *KSEE*, **25**(8), 977-983(2003).
12. Oh, K. J., Park, D. W., Kim, S. S. and Park, S. W., "Breakthrough Data Analysis of Adsorption of Volatile Organic Compounds on Granular Activated Carbon," *Korean J. Chem. Eng.*, **27**(2) 632-638(2010).
13. 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," *KSEE*, **21**(3), 481-488(1999).
14. Das, D., Gaur, V. and Verma, N., "Removal of Volatile Organic Compound by Activated Carbon Fiber," *CARBON*, **42** 2949-2962 (2004).
15. Shim, H. J., Lim, J. C., Lee, J. K. and Park, D. K., "Adsorption Characteristics of Volatile Organic Compounds on Activated Carbons," *HWAHAK KONGHAK*, **2**(2), 2219-2222(1996).
16. Lillo-Ródenas, M. A., Cazorla-Amorós, D. and Linares-Solano, A., "Behaviour of Activated Carbons with Different Pore Size Distributions and Surface Oxygen Groups of Benzene and Toluene Adsorption at Low Concentrations," *Carbon*, **43**(8), 1758-1767 (2005).
17. Lillo-Ródenas, M. A., Fletcher, A. J., Thomas, K. M., Cazorla-Amorós, D. and Linares-Solano, A., "Competitive Adsorption of a Benzene-toluene Mixture on Activated Carbons at Low Concentration," *Carbon*, **44**(8), 1455-1463(2006).
18. Shin, H. C., Park, J. W., Park, K. and Song, H. C., "Removal Characteristics of Trace Compounds of Landfill Gas by Activated Carbon Adsorption," *Environmental Pollution*, **119**(2), 227-236(2002).
19. Kapoor, A. and Yang, R. T., "Roll-up in Fixed-bed, Multicomponent Adsorption Under Pore-diffusion Limitation," *AIChE Journal*, **33**(7), 1215-1217(1987).
20. 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**(9), 5108-5117(2014).