

탄소흡착제에 의한 삼성분계 휘발성 유기화합물의 흡착특성

손미숙 · 김상도 · 우광재 · 박희재** · 서만철** · 이시훈† · 유승곤*

한국에너지기술연구원 청정시스템연구센터
305-343 대전시 유성구 장동 71-2
*충남대학교 공과대학 화학공학과
305-764 대전시 유성구
**시흥환경기술개발센터
경기도 시흥시 정왕동 2121
(2006년 10월 13일 접수, 2006년 10월 26일 채택)

Adsorption Characteristics of Three-components Volatile Organic Compounds on Activated Carbonaceous Adsorbents

Mi Sook Son, Sang Do Kim, Kwang Jae Woo, Hee jae Park**, Man cheol Seo**,
Si hun Lee† and Seung Kon Ryu*

Clean Energy System Research Center, Korea Institute of Energy Research, 71-2 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea

*Department of Chemical Engineering, Chungnam National University, Yuseong-gu, Daejeon 305-764, Korea

**Siheung Environmental Technology Research Center, 2121 Jeong-wang-dong, Si-heung, Gyeong-gi, Korea

(Received 13 October 2006; accepted 26 October 2006)

요 약

본 연구에서는 휘발성 유기화합물 중 산업공정에서 사용빈도가 가장 높은 방향족류의 toluene, 케톤류의 MEK, 알코올류의 IPA에 의한 삼성분계 휘발성 유기화합물의 탄소계 흡착제에 대한 흡착특성 실험을 수행하였다. 입상 활성탄, 활성탄소섬유를 이용한 단일흡착제와 입상 활성탄과 활성탄소섬유를 동시에 적용한 조합흡착제를 사용하여 흡착성능과 흡착량을 비교 분석하였다. 실험용 흡착장치를 사용하여 단일성분 및 삼성분계 휘발성 유기화합물에 대한 흡착과 실험을 수행하였으며, 각 경우에 대해 흡착량과 흡착성능을 비교하였다. 입상 활성탄은 toluene의 단일흡착 시 높은 흡착성능을 보였으나, IPA, MEK의 단일성분과 삼성분계 흡착실험에서는 상대적으로 낮은 성능을 보였다. 활성탄소섬유와 조합흡착제는 단일성분 흡착결과에서 모두 우수한 흡착성능을 보였으나, 삼성분계 흡착의 경우에는 흡착제의 경제성과 흡착효율을 고려하였을 때 입상 활성탄과 활성탄소섬유를 동시에 적용한 조합흡착제가 흡착제로서 가장 적합함을 확인할 수 있었다.

Abstract – Toluene of aromatic compounds, MEK of ketones and IPA of alcohols were extremely used as VOCs (Volatile Organic Compounds) on the getting into step with industrial process. The adsorption characteristics of three component solvent vapors (Toluene-MEK-IPA) on the activated carbonaceous adsorbents such as AC, ACF and AC+ACF were investigated in a stainless steel fixed bed adsorption experimental apparatus in order to identify those carbons for eliminating and recovering solvent vapors from industrial emission sources. The used activated carbonaceous adsorbents were pelletized commercial activated carbon and activated carbon fiber. The breakthrough curves and adsorption capacity have been obtained at atmospheric pressure in a adsorption fixed bed. It has been found that non-polar and larger molecules have been adsorbed better than polar and smaller molecules. Especially, alcohols and ketones were poorly adsorbed due to competitive adsorbability in ternary mixture system. However, it could be overcome by employment of activated carbonaceous adsorbent which have different porosity distribution appropriately.

Key words: Activated Carbon, Activated Carbon Fiber, Toluene, IPA, MEK, Adsorption

1. 서 론

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

족 탄화수소와 지방족 탄화수소와 같이 탄소와 수소 원소만으로 이루어진 일반 탄화수소와 질소 산소 및 할로겐 원소를 포함하는 비균질 탄화수소로 나뉜다[1]. 휘발성 유기화합물은 악취를 발생시켜 작업현장의 환경을 해칠 뿐만 아니라, 대기 중에서 태양에너지를 받아 질소화합물과 함께 광화학 스모그를 일으켜 2차 오염물질인 오존이나 PAN(peroxy acetyl nitrate) 등을 형성하여 인체에 악영향을

†To whom correspondence should be addressed.
E-mail: lsh3452@kier.re.kr

Table 1. Structure property characteristics of AC and ACF

Adsorbents	Adsorbent size	BET surface area (m ² /g)	Micropore area (m ² /g)	Micropore volumn (cc/g)	Average pore diameter (Å)
Coal-based Activated carbon (pellet)	100 mmL × 4 mmφ	1,005	972	0.50	20.17
Pan-based Activated carbon fiber(tow)	φ10 μm	1,058	1039	0.45	18.63

미친다. 휘발성 유기화합물은 대부분의 화학 및 제약공장, 용매와 세정제를 사용하는 산업체에서 배출되고 있으며, 이 중에서도 도장 및 인쇄공정, 플라스틱 관련공정, 유기화합물 제조공정 등이 THC(total hydro carbon)기준으로 300-10,000 ppm 범위의 비교적 많은 양이 배출되고 있다.

국내외에서 주로 사용되고 있는 휘발성 유기화합물은 크게 방향족류, 케톤류, 알코올류 등으로 나눌 수 있는데, 방향족의 대표적 화합물인 벤젠, 톨루엔, 자일렌, 케톤류의 MEK(methyl ethyl ketone), 그리고 알콜류인 IPA(isopropyl alcohol)화합물의 이용 빈도가 높다. 휘발성 유기화합물에 지속적으로 노출되는 산업현장의 근로자들은 피부접촉이나 호흡기 흡입을 통해 신경계 장애를 일으키거나 다량으로 함유된 발암물질 때문에 인체에 매우 유해한 영향을 받게 된다[2]. 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 분리 회수법이 있다. 이러한 처리 방법들은 휘발성 유기화합물을 포함한 처리 기체의 풍량과 농도에 따라 적용기술이 달라지기 때문에 적용하고자 하는 공정을 면밀하게 분석할 필요가 있다[3]. 특히, 국내의 휘발성 유기화합물을 배출하는 산업현장의 경우 정확한 배출량이 파악되지 않은 실정이므로 배출유량 및 농도에 대해서 폭 넓게 적용할 수 있는 유기화합물 처리기술이 필요하다. 현재 실제 산업현장에서 가장 많이 연구 및 응용되고 있는 휘발성 유기화합물의 처리기술은 운전 및 관리가 용이하고 비교적 효율이 높은 활성탄소 흡착방식이다. 한편, 휘발성 유기화합물 배출 공정은 일반적으로 다성분계인데, 활성탄소를 사용한 대부분의 흡착공정 연구는 toluene 단일성분에[6-8] 관한 것이 대부분이거나, 다성분계에 대한 연구라고 하더라도 활성탄소가 우수한 흡착 성능을 보이는 방향족 탄화수소의 대표적 물질인 BTX(benzen toluene xylene)에 관한 것으로[10, 11], 방향족류-케톤류-알콜류 등과 같은 다성분계 흡착특성에 대한 연구는 매우 저조한 실정이다. 특히, 다성분계의 흡착공정은 성분 간의 경쟁과 상호작용을 고려해야 하므로 단일성분에 비해 측정이 용이하지 않을 뿐 아니라, 흡착특성을 해석하는데도 어려움이 있다. 그러나, 실제 산업현장에서 휘발성 유기화합물의 제거 및 회수공정을 설계하는데 있어서 다성분계의 흡착에 관한 특성연구는 반드시 선행되어야 할 과제라 할 수 있다.

본 연구의 목적은 탄소흡착제에 의한 다성분계 휘발성 유기화합물의 흡착특성 연구에 있다. 탄소흡착제로는 입상 활성탄소와 활성탄소섬유를 사용하였고, 다성분계 흡착질로는 방향족류-케톤류-알콜류 중 가장 대표적이고 현장에서 사용 빈도가 높은 toluene-MEK-IPA 삼성분계를 선정하였다. 이 삼성분계 흡착질을 실제 산업현장의 배출현황에 근거하여 혼합농도를 조성한 후, 흡착제를 충전한 흡착탑을 통과시켜 과포화선을 구하고 탄소흡착제에 의한 삼성분계 흡착특성을 고찰하였다.

2. 실험

2-1. 실험재료

본 실험에서 사용한 탄소흡착제는 석탄계 입상 활성탄소(activated carbon, shinkwang, Korea)와 PAN계 활성탄소섬유(activated carbon fiber, mitsubishi Co., Japan)이며, 사용하기 전 105 °C로 유지된 건조조에서 12시간 동안 건조시킨 후 데시케이터에 옮기고 실온으로 냉각하여 사용하였다. 흡착제로 사용된 활성탄소와 활성탄소섬유의 특성을 Table 1에 나타내었다. 흡착질은 toluene(삼천화학공업, 한국, 99.5%), MEK와 IPA(supelco, Japan, 99.9%)를 사용하였으며, 각각의 물리화학적 특성을 Table 2에 나타내었다.

2-2. 실험장치 및 실험방법

본 실험에 사용된 실험 장치의 개략도를 Fig. 1에 도시하였다. 실험 장치는 흡착질을 일정한 농도로 주입하기 위한 주입부분, 흡착제를 충전시킨 흡착탑 부분, 그리고 배출농도를 일정한 간격으로 측정하기 위하여 측정기와 연결된 출구부분으로 구성되었다. 흡착탑은 내경 2 cm, 외경 3 cm, 길이 25 cm의 스테인레스 스틸관으로 흡착제가 충전된 흡착부의 길이는 20 cm로 하였다. 장치 및 주변 온도가 20 °C 이하이면 용매의 응축이 생기는 반면 30 °C 이상으로 상승하면 흡착효율이 떨어지고 특히, 케톤류의 경우 고온에서 흡착할 경우 활성탄소를 촉매로 하여 촉매 표면 반응을 일으킬 수 있기 때문에 장치 및 주변온도를 흡착이 가장 원활히 일어날 수 있는

Table 2. Physical properties of VOCs adsorbates

VOCs	Formula	Molecular weight (g/mol)	Boiling point (°C)	Specific gravity (g/cm ³)
Toluene	C ₆ H ₅ CH ₃	92.13	110.8	0.866
MEK	CH ₃ COC ₂ H ₅	72.10	80.0	0.805
IPA	(CH ₃) ₂ CHOH	60.09	82.5	0.789

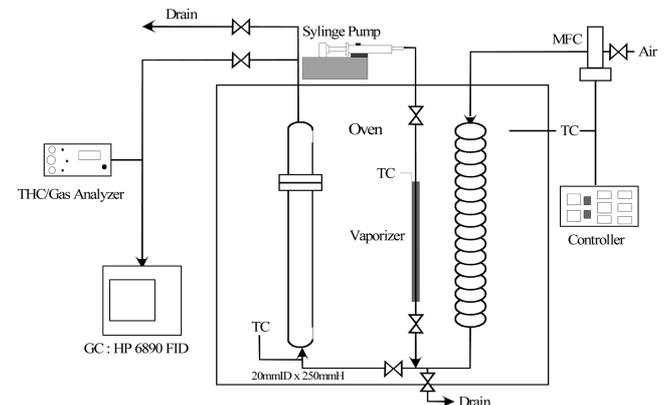


Fig. 1. Schematic diagram of the adsorption experimental setup.

25 °C로 일정하게 유지시키며 실험하였다.

각 실험에 적용된 휘발성 유기화합물은 삼성분의 경우 toluene, MEK, IPA를 각각 70 : 15 : 15의 비(wt%)로 혼합해 총 농도가 2,500 ppm이 되도록 조절하였으며, 단일성분의 경우도 각 물질의 농도가 2,500 ppm이 되도록 유량과 유입량을 조절하였으며 각각의 농도를 GC(gas chromatography)로 측정하였다. 휘발성 유기화합물은 정밀한 주사기(Labscale, Italy)를 사용하여 주입하였고 주입구부터 증발관 끝까지 열선을 감고 외부에 절연테이프를 감아 40 °C로 유지해 휘발될 수 있도록 하였다. 흡착질의 농도는 시간당 주입량을 변화시켜 조절하였는데 단일성분으로 주입할 경우, toluene, MEK, IPA는 각각 3.5 ml/hr, 7.5 ml/hr, 1.8 ml/hr로, 삼성분계의 경우 4.0 ml/hr로 주입하였으며 장치로 유입되는 공기의 유량은 유량계(MFC, Brooks)를 이용하여 5.0 l/min으로 정확히 조절하였다. 유입 및 출구의 농도는 GC(Aglient, HP 6890 FID)로 측정하였으며 GC용 운반가스로는 초고순도 헬륨을 사용하였다. 각 흡착제의 충전량으로 입상 활성탄소는 20 g, 활성탄소섬유는 10 g, 그리고 조합 흡착제일 경우에는 하단에 14 g의 입상 활성탄소를 채우고 그 위에 3 g의 활성탄소섬유를 충전하였다. 흡착성능(adsorption capacity)은 흡착탑으로 유입되는 휘발성 유기화합물의 시간에 따른 loading 양 및 유출 농도로부터 확인할 수 있었다[4].

3. 결과 및 고찰

3-1. 단일성분 흡착특성

Fig. 2는 탄소흡착제에 의한 단일성분 toluene의 (a)흡착과과곡선과 (b)흡착제에 유입되는 toluene의 양 및 배출농도를 도시한 것이다. 단일성분의 흡착실험에서는 각 흡착질의 유입농도 2,500 ppm의 5%인 125 ppm을 과과점으로 간주하였다. 흡착과과곡선에서 각 흡착제의 과과점을 살펴보면, 활성탄소가 95 min, 활성탄소섬유가 111 min, 활성탄소와 활성탄소섬유를 적용한 조합흡착제가 95 min일 때 과과점에 도달하는 것으로 나타났다. 이 중, 활성탄소섬유와 조합흡착제는 과과가 이루어지기 직전까지 유입되는 흡착질에 대하여 99%의 흡착성능을 나타내고 과과점 이후 매우 단시간 내에 포화점에 도달하는 특성을 보였다. 이것은 공극의 대부분이 미세기공으로 이루어져서 짧은 접촉시간에 최대흡착능력을 보이는 활성탄소섬유의 독특한 특징 때문에 일어나는 현상이다. 이러한 흡착특성은 활성탄소섬유와 활성탄소를 1 : 4.6의 비율로 혼합한 조합흡착제에서도 나타났다. 이는 활성탄소에 미처 흡착되지 못한 toluene이 2차 흡착제인 활성탄소섬유에 의해 빠른 속도로 흡착되어 전체적으로 활성탄소섬유의 구조적 특성이 활성탄소의 단점을 보완하는 현상으로 해석할 수 있다. 반면에 활성탄소는 과과점부터 포화까지 100 min이 넘는 시간이 소요되어 매우 완만한 곡선을 나타내었는데 이는 활성탄소의 기공이 미세 기공부터 큰 기공까지 다양한 크기로 이루어져있기 때문이다[5]. Fig. 2의 (b)에서 흡착실험이 완료된 후 중량 흡착량에 의해 측정된 각각의 포화 흡착율이 활성탄소는 37.65%, 활성탄소섬유는 63.77%, 조합흡착제는 총 33.58%의 포화 흡착율을 보여 세 가지 흡착제 모두가 30%가 넘는 효율을 나타낸 것을 확인할 수 있다. 또한, 과과점에서 흡착제 단위질량당 흡착된 toluene의 흡착량은 활성탄소, 활성탄소섬유, 조합흡착제가 각각 0.23 g/g, 0.59 g/g, 0.28 g/g으로 활성탄소섬유가 다른 흡착제보다 3배의 우수한 흡착성능을 보였고 활성탄소와 조합흡착제는 비슷한 결과를 보

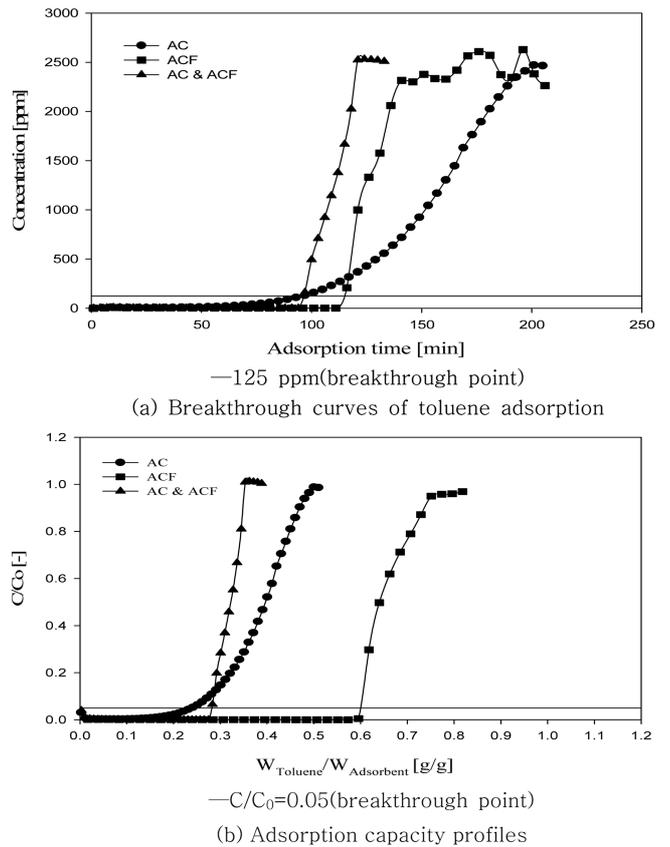
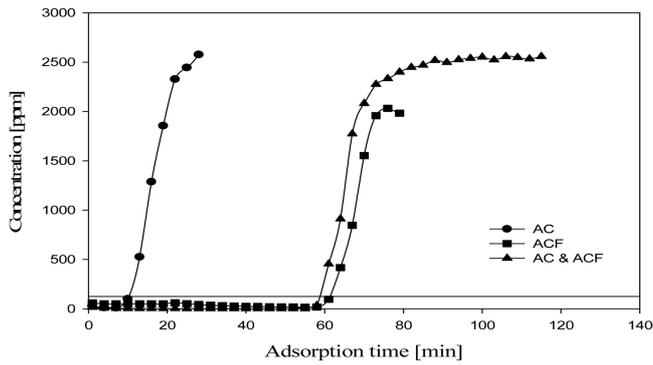


Fig. 2. Toluene adsorption on AC, ACF and AC&ACF (C_0 toluene = 2500 ppm, $Q = 5$ L/min).

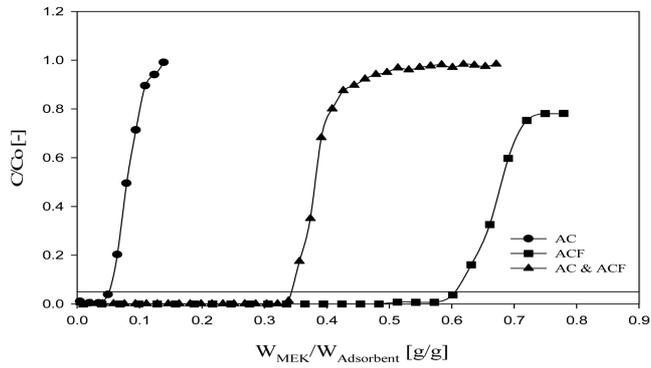
였다. Toluene의 흡착특성은 기존에 많은 연구가 이루어졌고 다른 연구결과에서도 볼 수 있듯이 분자크기가 크고 비극성물질이면서 탄소와 친화성이 높은 방향족 화합물로 활성탄소에 흡착이 잘되는 성질을 갖고 있어서 뛰어난 흡착성능을 나타낸다고 알려져 있다[6-8].

Fig. 3은 탄소흡착제에 의한 단일성분 MEK의 (a)흡착과과곡선과 (b)시간에 따른 흡착특성을 나타낸 것이다. 흡착과과곡선에서 활성탄소섬유와 조합흡착제는 각각 과과점에 도달하는 60 min과 62 min 동안 유입농도의 99%를 흡착한 반면, 활성탄소는 MEK주입 시점으로부터 10 min만에 과과점에 이르는 확인한 차이를 확인할 수 있었다. 흡착과과곡선에서 보이는 이와 같은 흡착특성은 (b)에서도 확인할 수 있었는데 각 과과점에서 활성탄소가 0.05 g/g, 활성탄소섬유가 0.61 g/g, 조합흡착제가 0.34 g/g을 흡착해 활성탄소보다 활성탄소섬유나 조합흡착제가 매우 뛰어난 성능을 보임을 알 수 있었다. 또한, 조합흡착제의 포화 흡착율 18.72% 중 활성탄소와 활성탄소섬유가 각각 16.35%, 29.75%의 포화 흡착율을 보여 단일흡착제로 적용했을 때 각각 8.20%와 22.0%의 포화 흡착율을 보였던 활성탄소의 2배, 활성탄소섬유의 1.4배 정도 흡착성능이 향상되는 효과를 나타냈다. 이와 같은 흡착성능의 차이를 보이는 것은 활성탄소섬유의 기공크기(pore diameter) 및 분포가 MEK와 부합하여 흡착을 용이하게 한 것으로 보여 진다.

Fig. 4는 탄소흡착제를 사용한 단일성분 IPA의 흡착특성을 나타낸 것으로 (a)흡착과과곡선과 (b)시간에 따른 흡착특성을 도시한 것이다. 활성탄소섬유는 100 min동안 유입농도에 대하여 99%의 흡착

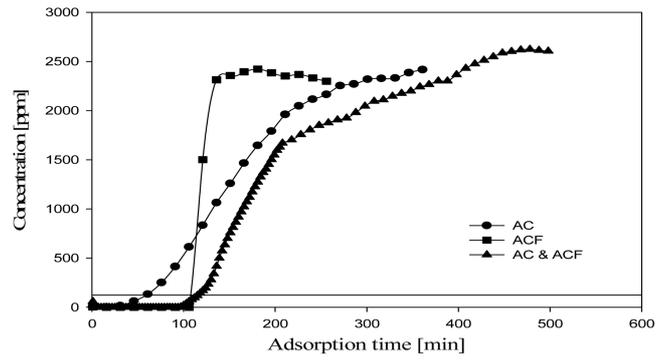


—125 ppm(breakthrough point)
(a) Breakthrough curves of MEK adsorption

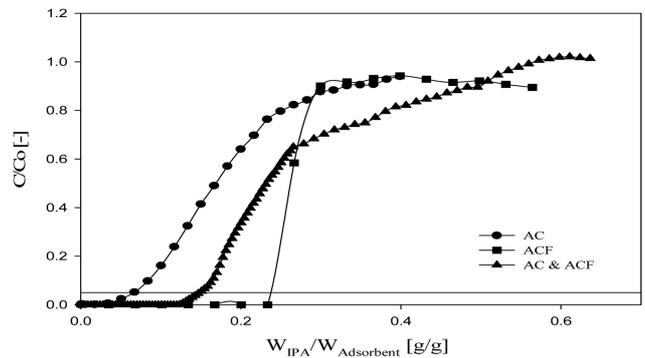


— $C/C_0=0.05$ (breakthrough point)
(b) Adsorption capacity profiles

Fig. 3. MEK adsorption on AC, ACF and AC&ACF ($C_{0, \text{MEK}} = 2500 \text{ ppm}$, $Q = 5 \text{ L/min}$).



—125 ppm(breakthrough point)
(a) Breakthrough curves of IPA adsorption



— $C/C_0=0.05$ (breakthrough point)
(b) Adsorption capacity profiles

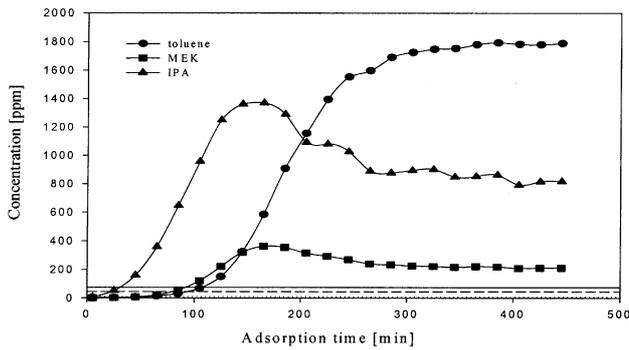
Fig. 4. IPA adsorption on AC, ACF and AC&ACF ($C_{0, \text{IPA}} = 2500 \text{ ppm}$, $Q = 5 \text{ L/min}$).

성능을 나타냈다. 또한, 과과점과 포화점이 거의 동시에 이루어지는 특징과 각각 29.94%의 포화 흡착율과 0.23 g/g의 흡착량을 나타내었다. 조합흡착제는 과과가 시작되기까지 약 100 min 동안 99% 이상의 흡착성능을 보인 반면, 활성탄소는 약 50 min에 과과가 시작되었고, 과과 시작 후 250 min 동안 완전한 곡선을 그리며 초기 유입 농도에 도달하였다. 이를 (b)에서 살펴보면 활성탄소가 20.27%, 조합흡착제가 20.93%의 포화 흡착율을 보여 흡착율로만 비교하면 활성탄소와 조합흡착제 모두가 20% 이상의 흡착율을 보여 비슷한 흡착성능을 나타낸 것처럼 보인다. 그러나, 과과점을 기준으로 측정된 흡착량에서 조합흡착제가 0.15 g/g을 흡착하여 0.06 g/g을 흡착한 활성탄소보다 2.3 배 더 흡착한 것으로 나타났다. 즉, 활성탄소는 과과점부터 포화점까지 조합흡착제와 비슷한 시간이 소요되었고, IPA 주입시점부터 과과점까지 조합흡착제 과과시간의 1/2 에도 미치지 못하는 짧은 과과시간을 나타냈음에도 불구하고 과과점의 흡착량이나 포화 흡착량 모두에서 조합흡착제 흡착량의 50%에 그치는 흡착성능을 보였다. 이는 활성탄소보다 확산거리가 짧고 흡착제 표면에 균일한 미세기공을 많이 지니고 있어서 흡착질과 흡착제가 접촉할 수 있는 비표면적이 넓어 빠른 속도로 흡착이 이루어지는 활성탄소 흡수의 영향 때문으로 사료된다[9]. 포화 흡착량은 활성탄소가 0.38 g/g, 활성탄소흡수가 0.56 g/g, 조합흡착제가 0.63 g/g으로 전체적인 흡착성능 역시 조합흡착제 > 활성탄소흡수 > 활성탄소의 순으로 나타났다.

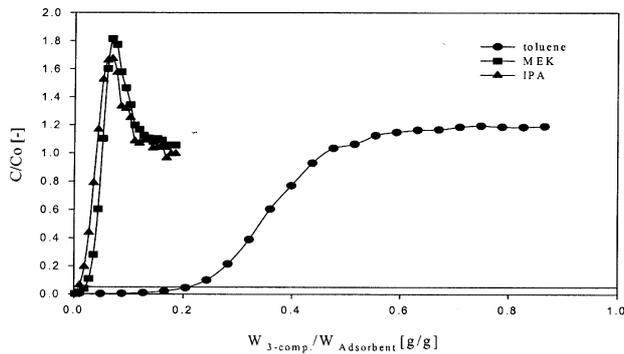
활성탄소가 활성탄소흡수나 조합흡착제에 비하여 완전한 과과곡선을 나타내는 특징은 toluene과 MEK의 흡착에서도 나타났으나 특히, IPA의 흡착에서 두드러지게 나타났다. 이는 발달된 세공이 모두 20Å 이하의 균일한 미세 기공으로 이루어져 확산 저항이 없어 물질 전달지역(mass transfer zone)이 매우 좁게 나타나 급격한 과과곡선을 보이는 활성탄소흡수와 달리 미세 기공부터 큰 기공까지 다양한 크기의 기공 분포를 가진 활성탄소의 특성 때문이다. 더군다나 IPA와 같은 알코올류는 극성물질이면서 분자크기가 작기 때문에 활성탄소에 대한 친화성이 방향족보다 크게 낮아서 보다 완전한 과과곡선을 형성한 것으로 사료된다.

3-2. 삼성분계 흡착특성

Fig. 5는 활성탄소를 이용하여 toluene, MEK, IPA 삼성분계를 흡착 실험한 것으로 각각 (a) 흡착과과곡선과 (b) 시간에 따른 삼성분의 흡착특성을 나타낸 그림이다. 삼성분계 흡착실험에서는 toluene, MEK, IPA의 각각의 유입농도인 1,500, 200, 800 ppm으로부터 5%에 해당하는 75, 10, 40 ppm을 과과점으로 선정하였다. 삼성분의 각 과과점은 IPA가 5 min, MEK가 65 min, toluene이 105 min으로 IPA > MEK > toluene 순으로 검출되는 것을 볼 수 있다. 각 과과점에서의 흡착량은 toluene이 0.21 g/g, MEK가 0.02 g/g, IPA가 0.008 g/g으로 나타났다. 지금까지 BTX(benzen toluene xylene)로 대표되는 방향족 탄화수소에 대한 활성탄의 우수한 흡착성능은 많이 보고되



—toluene : 75 ppm ...MEK : 10ppm --IPA : 40ppm(breakthrough point)
(a) Breakthrough curves of three components adsorption

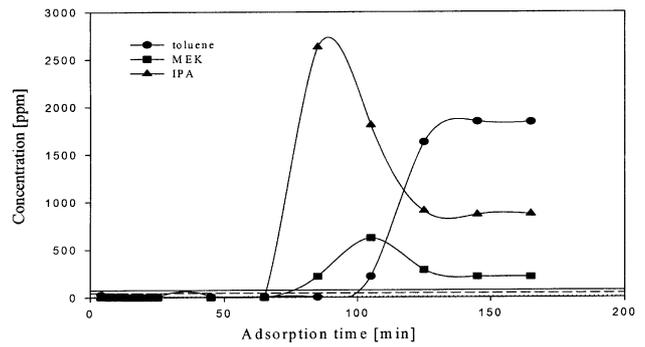


—C/C₀=0.05(breakthrough point)
(b) Adsorption capacity profiles

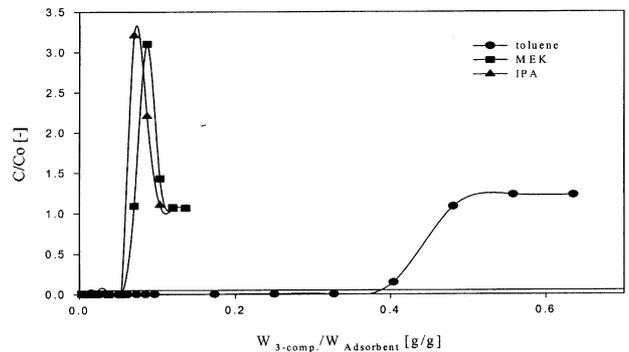
Fig. 5. Three components(toluene_MEK_IPA) adsorption on AC (C₀ Mixture = 2500 ppm, Q = 5 L/min).

고 있으며, 본 연구에서도 그 결과를 확인할 수 있다[10, 11]. 이와 같은 특징을 갖고 있으며 toluene 흡착 시 단일성분이나 삼성분계 모두에서 30% 이상의 흡착 효율을 보이는 활성탄소가 삼성분계에 대하여 이토록 낮은 흡착성능을 보이는 것은 이분포 구조를 갖고 있는 활성탄소의 특성과 탄소에 극성이고 분자크기가 작은 IPA의 특성이 융합되지 않기 때문이다. 또한, 탄소와 비극성 물질이어서 흡착율이 높은 toluene과 동시에 주입을 하기 때문에 IPA와 MEK가 초기에 흡착이 된다 하더라도 활성탄소와의 친화성이 가장 큰 toluene이 보다 오랫동안, 많은 양이 흡착되는 것이다.

Fig. 6은 활성탄소섬유를 이용하여 toluene, MEK, IPA삼성분계를 흡착 실험한 것으로 각각 (a)흡착과과곡선과 (b)시간에 따른 흡착특성을 나타낸다. 흡착과과곡선에서 각 흡착질의 과과점을 보면 toluene이 85 min, MEK가 65 min, IPA가 65 min 동안 흡착한 것을 알 수 있으며 과과점에 이르기까지 toluene, MEK, IPA 세 가지 성분 모두 100% 흡착되다가 과과점이 지나면서 급격히 검출되어 포화에 이르는 것을 확인할 수 있다. 이는 활성탄소섬유에는 대부분 미세기공(micropore)만이 발달하여 있어서 흡착질은 좁은 미세기공에서 이루어지는 미세기공 채움 현상이나 좀더 넓은 미세기공에서 이루어지는 협력흡착(cooperative adsorption)이 주 메커니즘이어서 흡착시간이 대단히 짧기 때문에 활성탄소에서는 흡착능력이 저조하였던 알코올류와 열화현상이 나타나는 케톤류에 대하여도 흡착능력이 우수할 뿐만 아니라, 삼성분계의 흡착에서 나타나는 흡착질 간의 경쟁과 상호작용에 큰 영향을 받지 않았다[12]. 과과점에서 각각의 흡



—toluene : 75 ppm ...MEK : 10ppm --IPA : 40ppm(breakthrough point)
(a) Breakthrough curves of three components adsorption



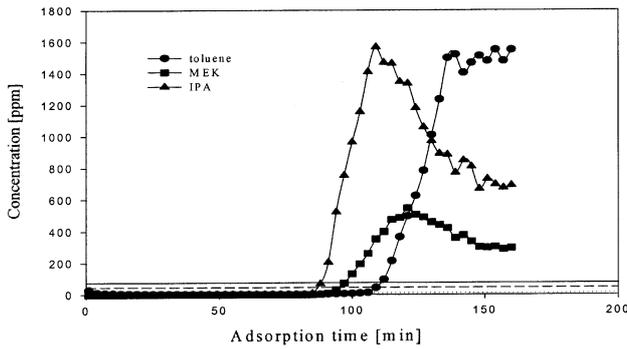
—C/C₀=0.05(breakthrough point)
(b) Adsorption capacity profiles

Fig. 6. Three components(toluene_MEK_IPA) adsorption on ACF (C₀ Mixture = 2500 ppm, Q = 5 L/min).

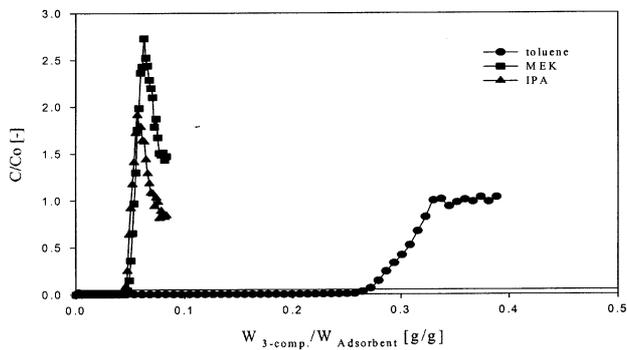
착량은 toluene이 0.35 g/g, MEK가 0.05 g/g, IPA가 0.05 g/g이었다.

Fig. 7은 조합흡착제에 의한 toluene, MEK, IPA삼성분계 흡착 실험으로 각각 (a)흡착과과곡선과 (b)시간에 따른 흡착특성을 나타낸 그림이다. (a)에서 toluene, MEK, IPA 각각의 흡착질은 109 min, 94 min, 85 min 에 과과가 시작되는데 과과점이 시작되기 전까지 99%의 흡착성능을 보인 것을 확인할 수 있었다. 각 과과점에서의 흡착량은 toluene이 0.26 g/g, MEK가 0.04 g/g, IPA가 0.04 g/g이었으며 활성탄소나 활성탄소섬유에서와 같이 조합흡착제 역시 IPA > MEK > toluene 순으로 검출되었다. 이는 toluene, MEK, IPA의 분자구조 및 크기, 극성의 정도, 탄소원소에 대한 친화력 차이 때문에 나타난 결과라 해석할 수 있다.

각 Figure의 흡착과과곡선을 통해 IPA와 MEK가 toluene에 비하여 빠른 시간에 검출되는 유사한 특성을 가지고 있음을 모든 탄소 흡착제에서 확인할 수 있었다. 물론, 활성탄소의 흡착성능이 활성탄소섬유와 조합흡착제에 비하여 현저히 저하되어 있으나 IPA > MEK > toluene 순으로 검출되는 흡착특성은 동일하게 나타나고 있다. 이는 각 흡착질의 분자량 및 탄소에 대한 친화성으로 설명할 수 있는데 toluene, MEK, IPA가 각각 92.14, 72.12, 60.10의 분자량을 갖고 있으며, 탄소친화성도 방향족류인 toluene, 케톤류인 MEK, 알코올류인 IPA의 순으로 이루어져 Figure 상에서 검출되는 순서와 부합된다. 이러한 현상은 경쟁흡착의 특성으로도 설명되어질 수 있는데 IPA와 MEK가 이미 흡착되어 있더라도 분자량이 가장 크고 탄소에 잘 결합되는 특성을 가진 toluene에 의해 밀려날 수 있다. 이와 같



-toluene : 75 ppm ···MEK : 10ppm --IPA : 40ppm(breakthrough point)
(a) Breakthrough curves of three components adsorption



-C/C₀=0.05(breakthrough point)
(b) Adsorption capacity profiles

Fig. 7. Three components(toluene_MEK_IPA) adsorption on AC & ACF
(C₀ Mixture = 2500 ppm, Q = 5 L/min).

은 경쟁흡착현상은 활성탄소섬유나 조합흡착제보다 활성탄소에서 매우 두드러지게 나타나는데 이것은 활성탄소의 넓은 기공분포 때문이다. 활성탄소가 활성탄소섬유에 비하여 비교적 크고 다양한 기공 분포를 가졌기 때문에 세 가지 물질을 동시에 주입하여 흡착할 경우 toluene보다 분자량이 상대적으로 작고 탄소 친화성이 떨어지는 IPA와 MEK의 흡착이 용이하지 않다. 또한, 흡착이 되었다 하더라도 toluene에 의한 탈착현상이 일어나게 되어 유입농도보다 2배 가량 높게 검출되는 것이다. 한편, 파괴점을 기준으로 하는 활성탄소섬유 > 조합흡착제 > 활성탄소의 순으로 나타나 활성탄소섬유가 가장 우수한 성능을 가진 것으로 보이나 조합흡착제와 10%가량 밖에 차이가 나지 않았다. 또한, 각 흡착제의 파괴점에서 중량 흡착량을 비교하였을 경우 활성탄소와 활성탄소섬유를 단일흡착제로 적용하였을 경우보다 조합흡착제로 적용하였을 경우에 2~5배 가량의 성능 향상 효과를 이끌어내었음을 확인할 수 있었다.

이상의 결과를 통해 toluene은 단일흡착 실험 시, 세 가지 흡착제 모두에서 30% 이상의 포화 흡착율을 보여 산업현장의 배출가스가 toluene만 배출된다는 가정 하에서 활성탄소의 단독적용에 무리가 없었다고 판단되었다. 그러나, 배출되는 휘발성 유기화합물은 toluene이나 단일성분으로만 한정되어 있는 것이 아니고, 삼성분계 이상의 복합성분으로 이루어져 있다. 활성탄소는 활성탄소섬유보다 10배 가량 저렴한 가격으로 유통되고 있지만, 극성인 흡착질과 케톤류나 알코올류를 포함한 다성분계의 흡착에 있어서는 매우 저조한 흡착

성능을 나타냈다. 반면에 활성탄소섬유는 다양하고 복합적인 흡착 질에 대하여 뛰어난 흡착성능을 갖고 있다. 그러나, 흡착탐에 활성탄소섬유만을 충전하였을 경우 압력손실이 높고 충전 밀도가 낮으며 활성탄소에 비하여 매우 고가인 단점이 있다. 따라서, 본 연구 결과에서 볼 수 있듯이 삼성분계의 흡착은 활성탄소와 활성탄소섬유를 동시에 적용한 조합흡착제가 효율성 및 경제적 측면에 있어서 휘발성유기화합물의 흡착제거에 가장 적합한 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 탄소흡착제에 의한 단일성분 및 삼성분계 흡착실험을 통해 휘발성 유기화합물의 제거효율을 향상시키고 경제성을 갖춘 흡착제거방법 도출에 그 목적이 있다.

(1) 단일성분 흡착실험에서 파괴 흡착량을 기준으로 비교한 각 흡착제의 흡착성능은 활성탄소섬유 > 조합흡착제 > 활성탄소 순으로 나타났다.

(2) 삼성분계 흡착실험의 경우, 활성탄소, 활성탄소섬유, 조합흡착제 모두에서 각 흡착질의 파괴점이 toluene > MEK > IPA 순으로 나타났음을 확인할 수 있었다.

(3) 본 연구로부터 활성탄소와 활성탄소섬유의 적절한 조합에 의하여 삼성분계 휘발성 유기화합물을 경제적이면서 효율적으로 제거하기 위한 시스템 개발의 기초자료를 제시할 수 있었다.

참고문헌

- 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).
- 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).
- 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).
- Cho, C. H. and Lee, H. J., "The Prediction of Binary Gas Mixture Adsorption Equilibria from Single Component Adsorption Isotherm," *HWAHAK KONGHAK*, **29**(6), 709-716(1991).
- 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).
- 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," *KENSS*, **14**(1), 977-983(2003).
- 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), 665-973(2002).
- 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).
9. Ryu, Y. K., Roh, D. S. and Lee, C. H., "Desorption Characteristics of MEK and Toluene from Activated Carbon Fiber by Supercritical Carbon Dioxide," *HWAHAK KONGHAK*, **36**(1), 56-61(1998).
 10. 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).
 11. Das, D., Gaur, V. and Verma, N., "Removal of volatile organic compound by activated carbon fiber," *CARBON*, **42**, 2949-2962 (2004).
 12. Gregg, S. J., "Adsorption, Surface Area and Porosity," 2nd edition, ACADEMIC PRESS, INC, U.K. 3-5(1982).
 13. Yoo, K. S., Shin, J. W., Shin, S. W., Jeong, J. H., Song, K. S., Seo, Y. S. and Kang, S. K., "Characteristics of Methanol Adsorption over Thermally Treated Activated Carbon," *HWAHAK KONGHAK*, **41**(4), 491-496(2003).
 14. Kim, D. J., Shim, W. G. and Moon, H., "Adsorption Equilibrium of Solvent on Activated Carbon," *HWAHAK KONGHAK*, **18**(4), 518-524(2001).
 15. Park, J. T., Kim, J. S., Chung, K. H., Moon, H. and Seo, G., "Gaseous Adsorption Properties of n-Hexane, Methyl ethyl ketone and Toluene on Granular Activated Carbon," *HWAHAK KONGHAK*, **32**(3), 476-481(1994).
 16. Yoo, K. S., Jang, W. S., Sung, W. S., Jong, H. J., Kwang, S. S., Yong, S. S. and Soon, K. K., "Characteristics of Methanol Adsorption over Thermally Treated Activated Carbon," *HWAHAK KONGHAK*, **41**(4), 491-496(2003).