

ORIGINAL ARTICLE

유증기를 구성하는 주요 10종류 성분의 온도에 따른 흡·탈착특성 비교

이승우 · 나영수¹⁾ · 이민규*

부경대학교 화학공학과, ¹⁾세계화학공업(주) 연구소

Comparisons of Adsorption-Desorption Characteristics of Major 10 Kinds Components Consisting of Gasoline Vapor

Song-Woo Lee, Young-Soo Na¹⁾, Min-Gyu Lee *

Department of Chemical Engineering., Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

¹⁾Segye Chem. Co., Ltd., R & D Center, Kyungnam, 626-120, Korea

Abstract

Adsorption and desorption characteristics of the representative 10 kinds components consisting of gasoline vapor on activated carbon were investigated at the temperature range of -30°C~25°C. The breakthrough curves of each vapors obtained by the Thomas model were well described the breakthrough experimental results of this study. The breakthrough times of each vapors were correlated with the molecular weight, density, and vapor pressure. The breakthrough times had greater correlation with boiling point than molecular weight and density. The slope of the breakthrough curve was a proportional relationship with the rate constant (k) of Thomas model expression. The higher the slope of the breakthrough curve, the rate constant was larger. The biggest slope vapor had the smallest adsorption capacity (q_e). Adsorption and desorption characteristics of mixed vapor similar to the gasoline vapor were studied at room temperature (25°C). The mixed vapor consisting of 9 components; group A (pentane, hexene, hexane), group B (benzene, toluene), group C (octane, ethylbenzene, xylene, nonane) was examined. Group A was not nearly adsorbed because of substitution by group C, and the desorption capacity of group A was smaller than group C. The adsorbed substances were confirmed to be Group C.

Key words : Gasoline vapor, Adsorption, Desorption, Activated carbon, Thomas model

1. 서론

휘발유(gasoline)는 여러 가지 paraffins, olefins, naphthenes, 그리고 aromatics 화합물이 혼합된 물질이며, 그 구성성분은 원유의 산출지역과 정유조건에 따라 차이가 있기 때문에 정확한 구성성분의 종류와 양은 측

정하기 힘들다. 산업의 발전과 운송수단이 발달함에 따라 자동차 사용량이 증가하고, 그에 따라 도심 내에 유류저장장치 및 주유소의 수도 증가함으로써, 인구가 밀집한 도심의 주유소에서 휘발성 유기화합물(volatile organic compounds, VOCs)을 포함하고 있는 유증기(gasoline vapor)의 지속적인 방출은 심각한 대기 환경

Received 24 June, 2014; Revised 29 August, 2014;

Accepted 2 September, 2014

*Corresponding author : Min-Gyu Lee, Department of Chemical Engineering., Pukyong National University, Busan 608-739, Korea
Phone: +82-51-629-6435
E-mail: mglee@pknu.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© 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.

문제를 초래하고 있다. 유증기에 함유된 주요물질은 benzene, ethylbenzene, toluene, 그리고 xylene이며, 이 물질들은 건강에 해로울 뿐만 아니라 오존(ozone) 생성의 전구물질로 알려져 있어(Shie 등, 2003), 대기로부터 방출되는 VOCs를 제거하기 위한 많은 연구가 수행되었다(Chue 등, 2004; Khan과 Ghoshal, 2000). VOCs를 회수하는 회수장치는 일반적으로 흡착공정, 탈착공정, 그리고 응축공정으로 이루어져 있는데, 저온에서 응축 회수하는 것이 특징이다(Lee 등, 2013). 그러나 VOCs를 회수하는 연구의 대부분은 주로 상온에서 수행되었고, 저온에서의 흡-탈착에 관한 연구는 상당히 부족한 실정이다.

Shie 등(2003)이 온도 27.3°C에서 무연휘발유에 포함된 유증기 성분을 분석한 결과에 의하면, 탄화수소 성분은 propane(C₃H₈), butane(C₄H₁₀), pentane(C₅H₁₂), benzene(C₆H₆), hexene(C₆H₁₂), hexane(C₆H₁₄), toluene(C₇H₈), heptane(C₇H₁₆), ethylbenzene(C₈H₁₀), xylene(C₈H₁₀), octane(C₈H₁₈), 그리고 nonane(C₉H₂₀)이고, 이 중 주요성분은 C₄~C₆이었으며 나머지는 H₂O, N₂, 그리고 O₂라고 하였다. 또한 유증기 중의 총탄화수소의 농도는 11.29 vol%이고, 습도(H₂O)는 2.33 vol%, 질소 68.23 vol%, 산소 18.13 vol%이었다고 하였다.

이와 같이 유증기 중에는 많은 종류의 VOC가 포함되어 있음에도 불구하고 유증기 성분의 흡착연구에 사용된 VOC의 대부분이 BTX(benzene, toluene, xylene) 3성분에 국한되어 있고(Lee 등, 2006a; Lee 등, 2007),

이들 연구의 대부분이 상온에서의 흡착에 관련된 것으로 넓은 온도범위에서 다양한 흡착질을 사용한 연구는 아직 부족한 실정이다(Lee 등, 2012a, 2012b; Popescu 등, 2003; San Miguel 등, 2001). 또한 이들 연구의 대부분은 1가지 및 2가지 성분의 흡착질만을 사용한 것으로 다양한 흡착질에 대한 상대적인 비교에 대한 연구는 거의 보이지 않았다.

따라서 본 연구는 유류 저장소 및 주유소에서 배출되는 유증기에 포함되어 있는 대표적인 10가지 증기(pentane, benzene, hexene, hexane, toluene, heptane, ethylbenzene, xylene, octane, nonane)를 흡착질로 각각 사용하여 -30~25°C 사이의 비교적 넓은 온도범위에서의 흡착특성을 고찰하여 상대적으로 낮은 온도에서의 흡착특성을 비교하였으며, 또한 9성분(pentane, benzene, hexene, hexane, toluene, ethylbenzene, xylene, octane, nonane)을 혼합한 혼합증기를 제조하여 흡-탈착시의 특성을 비교 고찰하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험 재료

흡착제는 Westvaco사(U.S.A.)에서 제조한 크기가 12~16 mesh인 파쇄형 활성탄(WVA-1100)을 사용하였다. 흡착질은 유증기에 포함된 대표적인 성분 10가지인 pentane(C₅H₁₂), benzene(C₆H₆), hexene(C₆H₁₂), hexane(C₆H₁₄), toluene(C₇H₈), heptane(C₇H₁₆), ethylbenzene

Table 1. Characteristics of major 10 kinds components of gasoline vapors

No.	Component	Molecular weight, g/mol	Boiling point, °C	Vapor pressure at 20°C, mmHg	Density, g/ml	Purity, %	Maker
1	Pentane (C ₅ H ₁₂)	72.15	36.1	442	0.626	99	Kanto
2	Benzene (C ₆ H ₆)	78.11	80.1	79.4	0.878	99.5	Junsei
3	Hexene (C ₆ H ₁₂)	84	60-66	143.75	0.678	97	Acros
4	Hexane (C ₆ H ₁₄)	86	69	127	0.626	95	Samchun
5	Toluene (C ₇ H ₈)	92.14	110.6	23.2	0.867	99.5	Junsei
6	Heptane (C ₇ H ₁₆)	100.21	98.42	37.4	0.684	99	Kanto
7	Ethylbenzene (C ₈ H ₁₀)	106.16	136	8	0.867	99.8	Samchun
8	Xylene (C ₈ H ₁₀)	106.16	138-144	7	0.871	98	Junsei
9	Octane (C ₈ H ₁₈)	114.23	125.52	10.7	0.703	97	Samchun
10	Nonane (C ₉ H ₂₀)	128.2	151	4.05	0.718	99	Acros

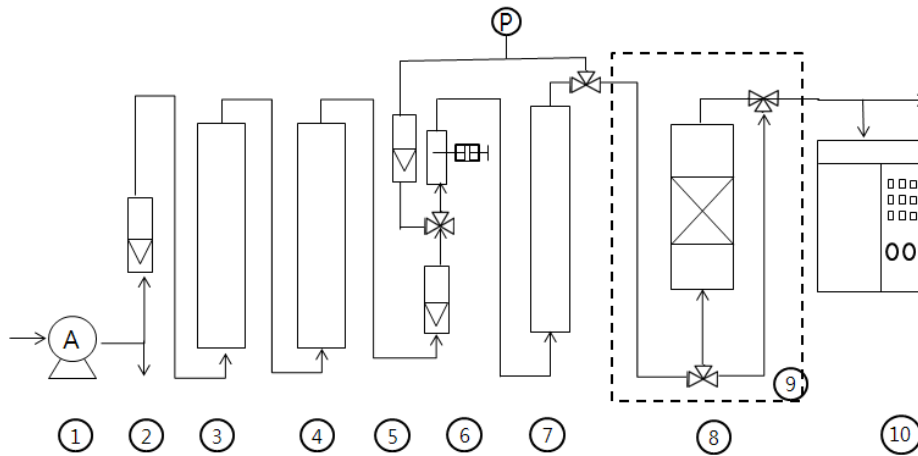


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus (① air pump, ② flow meter, ③ silica gel tube, ④ activated carbon tube, ⑤ flow meter, ⑥ syringe pump, ⑦ mixing chamber, ⑧ adsorption-desorption column, ⑨ refrigerator, ⑩ GC).

(C₈H₁₀), xylene(C₈H₁₀), octane(C₈H₁₈), 그리고 nonane (C₉H₂₀)을 사용하였으며, 이들의 물리적 특성치와 제조사는 Table 1과 같다.

2.2. 실험방법

흡·탈착 실험에 사용한 장치는 Fig. 1과 같다. 온도에 따른 특성은 장치의 흡·탈착층(adsorption-desorption column)에 부착된 온도조절장치(refrigerator)를 사용하여 운전온도를 -30℃, 0℃, 25℃로 조절하여 실험하였다. 단일 성분의 증기는 장치에 Air pump(Young Nam Yasunaga Co., Ltd. LP-40A)로 공급되는 유량 2 L/min의 공기를 유입하면서 실린지 펌프(Cole Parmer International, U.S.A. p-74901-10)로 액상의 성분을 일정한 속도로 공급하며 기화시켜 실험에 필요한 증기농도 1,000 ppmv로 제조하였다. 혼합성분의 증기는 혼합 성분 각각의 증기농도가 500 ppmv가 되게 제조한 액상의 혼합액을 실린지 펌프에 넣고 단일성분 증기와 같은 방법으로 혼합증기를 제조하여 사용하였다. 발생된 증기는 by-pass line으로 통과시키면서 해당 증기의 농도가 설정치의 ±5% 이내로 유지될 때 흡착층 내로 통과시키면서 흡착실험을 수행하였다. 탈착실험은 흡착질로 포화된 시료에 공기를 2 L/min의 속도로 유입시키며 혼합증기로 포화된 시료의 흡착질들을 탈착시키고, 출구에서 탈착증기의 농도를 측정하며 탈착실험을 수행하

였다.

2.3. 특성분석

BET 비표면측정기(Micromeritics, AUTOSORB-1)를 사용하여 흡착제로 사용한 활성탄의 기공특성을 고찰하였다. 측정된 활성탄의 특성치는 비표면적(BET specific surface area) 1,760 m²/g, 총세공부피(Total pore volume) 1.508 cm³/g, 평균세공직경(Average pore size diameter) 34.28 Å이었다. 각 증기의 농도는 FID(Flame Ionization Detector)와 Auto sampler(sampling loop 용량, 0.5 ml)가 장착된 gas chromatography(Donam, DS-6200)를 사용하여 증기농도를 일정 간격으로 분석하였다. Gas chromatography의 분석조건은 Table 2와 같다. 흡착관의 출구에서 유출 증기농도(C)가 흡착관 입구의 유입 증기농도(C₀)와 거의 같은 수준(C/C₀≒1)이 되었을 때를 흡착평형으로 간주하고 흡착실험을 종료하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 온도(-30~25℃)에 따른 10종류 증기의 흡착특성 비교

유증기를 구성하는 대표적인 10종류 증기를 각각 사용하여 증기로 흡착온도에 따른 활성탄 흡착특성을 고

찰하였다. Fig. 1의 연속식 고정층 흡착장치를 사용하여 각 증기농도는 1,000 ppmv, 공기유량은 2 L/min, 활성탄량은 2 g의 조건으로 흡착실험을 수행하였다.

온도 25°C에서 파과실험의 결과는 Fig. 2에, 온도 0°C에서의 파과실험결과는 Fig. 3에 나타내었으며, 온도 -30°C에서의 파과실험의 결과는 Fig. 4에 나타내었다. 흡착층 출구농도를 흡착층 입구농도로 나눈값 (C/C_o)을 흡착시간에 따라 도시하여 파과곡선을 얻었다. 온도 25°C, 0°C, 그리고 -30°C에서 얻은 파과곡선의 결과를 Thomas model(Thomas, 1944)에 대입하여 비선형회귀로부터 구한 Thomas 속도상수(k)와 최대흡착용량(q_e)을 Table 3에 나타내었다. Thomas model은 고정층 흡착층의 성능을 해석하는데 널리 사용되는 모델식 중의 하나로서 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{C}{C_o} = \frac{1}{1 + \exp(kq_e X/Q - kC_o t)} \quad (1)$$

여기서, C 는 유출농도(mg/L), C_o 는 유입농도(mg/L), t 는 흡착시간(min), k 는 Thomas 속도상수(mL/min·mg), q_e 는 최대흡착용량(mg/g), Q 는 유량(mL/min), X 는 흡착제 양(g)이다.

Fig. 2~4에서 보듯이 각각의 온도에서 수행한 파과실험 결과는 식(1)을 사용하여 구한 파과곡선과 잘 일치하므로, Thomas model은 온도범위 -30~25°C에서 본 연구의 파과곡선을 잘 묘사하는 것으로 판단되었다. Fig. 2에서 보면 온도 25°C에서 10종류 증기의 파과시간(초기농도의 10%)은 35~100 min 범위에 있었으며 파과의 순서는 6단계로 구분할 수 있었다. 1단계는 pentane, 2단계는 hexane, 3단계는 hexene, benzene, 그리고 heptane, 4단계는 octane, 5단계는 toluene, ethylbenzene, 그리고 nonane, 6단계는 xylene으로 나타났다. 5단계의

toluene, ethylbenzene, 그리고 nonane의 파과시간은 차이를 구분하기 힘들 정도로 차이가 거의 없었다. 온도 25°C에서 파과실험을 수행한 결과 파과시간이 제일 작은 pentane은 35 min인데 heptane은 50 min, toluene은 80 min, 그리고 제일 긴 xylene은 100 min으로, xylene의 파과시간은 pentane에 비해 약 2.8배 차이가 있는 것을 알 수 있었다. 상대적으로 분자량이 큰 성분일수록 파과시간이 길고 흡착량도 많음을 알 수 있었으며, 각 증기의 파과시간의 크기는 Table 1에 나타난 각 물질의 분자량, 밀도, 그리고 증기압의 크기와 상관관계가 있었다. Table 1에서 10 종류 증기의 증기압의 크기는 pentane, pexene, pexane, penzene, heptane, toluene, octane, ethylbenzene, xylene, 그리고 nonane 순서로 나타났다. 파과시간의 크기순서는 분자량과 밀도 보다는 끓는점(boiling point)과의 사이에 상관관계가 더 큰 것으로 판단되었다. Lee 등(2008)은 Acetone, MEK, benzene, 그리고 toluene을 흡착질로 사용한 활성탄 흡착연구에서 평형흡착량과 흡착질의 분자량, 분자크기, 밀도, 끓는점, 그리고 증기압과의 상관관계를 고찰한 결과, 평형흡착량과 흡착질의 분자크기, 끓는점, 그리고 증기압과의 결정계수(r^2)가 0.98 이상의 상관관계를 보였다고 하였다.

온도 25°C의 파과실험에서 각 물질의 파과시간이 길수록 최대흡착량 (q_e)이 많아짐을 볼 수 있었고, 파과시간이 가장 긴 xylene이 가장 큰 최대흡착량을 나타내었다. 파과곡선의 기울기와 속도상수(k) 값은 비례관계에 있었다. 파과곡선의 기울기가 클수록 속도상수 값이 컸고 기울기가 가장 큰 pentane의 경우에 가장 적은 최대흡착량 (q_e)을 나타내었다. 또한 k 값이 가장 작은 xylene의 경우에 가장 작은 기울기와 가장 많은 최대흡착량 (q_e)을 보였다. 이러한 결과를 통해 k 값이 클수록 흡착질이 흡착제에 빨리 흡착되어 파과곡선의 기울기

Table 2. Analysis conditions for vapors by gas chromatography

GC	Donam DS-6200
Detector	FID (Flame Ionization Detector)
Oven temperature	100°C
Injector temperature	250°C
Detector temperature	200°C
Flow rate (N ₂ :H ₂ :Air), mL/min	30 : 30 : 300

가 커지고 파과시간도 빨라지는 것을 알 수 있었다.

Fig. 3에서 보면 온도 0℃에서 10종류 증기의 파과시간(초기농도의 10%)은 40~180 min 범위에 있었으며 파과의 순서는 pentane, hexene, hexane, benzene, heptane, octane, toluene, nonane, xylene, 그리고 ethylbenzene의 순서로 나타났다. Fig. 2의 25℃에서 보다 파과시간의 순서를 비교적 잘 구분할 수 있었다. 온도 0℃에서

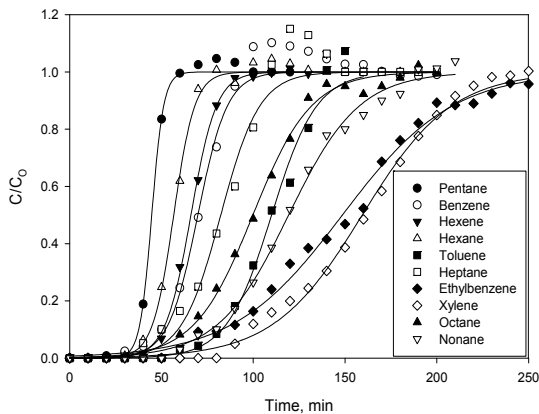


Fig. 2. Comparisons of breakthrough curves on activated carbon of 10 kinds vapors; pentane, benzene, hexene, hexane, toluene, heptane, ethylbenzene, xylene, octane, and nonane at 25℃ (vapor concentration, 1,000 ppmv; air flow rate, 2 L/min; activated carbon, 2 g).

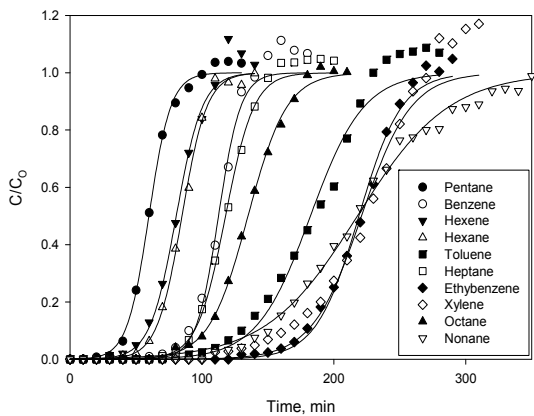


Fig. 3. Comparisons of breakthrough curves on activated carbon of 10 kinds vapors; pentane, benzene, hexene, hexane, toluene, heptane, ethylbenzene, xylene, octane, and nonane at 0℃ (vapor concentration, 1,000 ppmv; air flow rate, 2 L/min; activated carbon, 2 g).

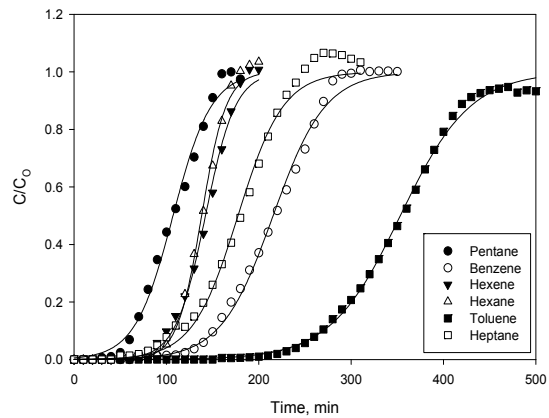


Fig. 4. Comparisons of breakthrough curves on activated carbon of 10 kinds vapors; pentane, benzene, hexene, hexane, toluene, heptane, ethylbenzene, xylene, octane, and nonane at -30℃ (vapor concentration, 1,000 ppmv; air flow rate, 2 L/min; activated carbon, 2 g).

파과실험을 수행한 결과를 보면 파과시간이 제일 작은 pentane은 40 min인 것에 비해 heptane은 95 min, toluene은 130 min, 제일 긴 ethylbenzene은 180 min으로, ethylbenzene의 파과시간은 pentane에 비해 약 4.5 배 차이가 있는 것을 알 수 있었다. 또한 온도 0℃에서는 25℃에 비해 파과시간이 길었고 파과시간의 범위도 약 2.2배 정도 긴 것을 알 수 있었다. 각 증기의 파과시간 순서는 온도 25℃와 비슷한 결과를 보였다. 온도 0℃에서도 속도상수(k)와 최대흡착량(qe)의 특성은 온도 25℃에서와 같은 경향을 보였다.

온도 -30℃에서 실험에 사용한 각 증기의 응축농도는 Table 4과 같으며, ethylbenzene, xylene, octane, 그리고 nonane은 온도 -30℃에서 1,000 ppmv의 증기농도가 만들어 지지 않았기 때문에 비교하지 못했다. 이것은 Table 1에 있는 증기의 특성치 차이 때문이라 판단되었다. 분자량이 커질수록 증기의 비점과 증기압이 감소하여 증기화 되기 어렵기 때문에 상대적으로 고분자 물질은 저분자 물질에 비해 고 농도의 증기를 만들기 어려웠다. Fig. 4에서 보면 온도 -30℃에서 10종류 증기의 파과시간(초기농도의 10%)은 60~260 min 범위에 있었으며 파과의 순서는 pentane, hexene, hexane, heptane, benzene, 그리고 toluene의 순서로 나타났다. 온도 -30℃에서 파과실험을 수행한 결과를 보면 파과시간이

Table 3. Comparisons of Thomas model parameters according to adsorption temperature

No	Vapor	-30℃		0℃		25℃	
		k	q _e	k	q _e	k	q _e
1	Pentane	0.0482	107149	0.1205	59821	0.308	44724
2	Benzene	0.0353	215516	0.1186	112574	0.125	69835
3	Hexene	0.0616	142285	0.1006	80550	0.144	66075
4	Hexane	0.0753	138137	0.1059	84899	0.174	56687
5	Toluene	0.0263	353259	0.0493	182261	0.081	110011
6	Heptane	0.0407	177498	0.0926	117922	0.094	82324
7	Ethylbenzene	-	-	0.0614	219051	0.034	148564
8	Xylene	-	-	0.0532	221052	0.041	159388
9	Octane	-	-	0.0677	134945	0.063	99810
10	Nonane	-	-	0.0289	217882	0.052	119275

Table 4. Comparisons of condensation concentrations of 10 kinds vapors at -30℃

No	Vapors	Condensation concentration, ppmv
1	Pentane (C ₅ H ₁₂)	77,000
2	Benzene (C ₆ H ₆)	4,000
3	Hexene (C ₆ H ₁₂)	18,000
4	Hexane (C ₆ H ₁₄)	8,900
5	Toluene (C ₇ H ₈)	1,300
6	Heptane (C ₇ H ₁₆)	3,000
7	Ethylbenzene (C ₈ H ₁₀)	215
8	Xylene (C ₈ H ₁₀)	200
9	Octane (C ₈ H ₁₈)	665
10	Nonane (C ₉ H ₂₀)	90

제일 작은 pentane은 60 min인데 비해 heptane은 110 min, toluene은 260 min이었다. 분자량이 제일 작은 pentane은 25℃에서 0℃와 -30℃까지의 온도변화에 따라 파과시간이 35 min에서 40 min, 60 min으로 증가되어 증가의 차이가 비교적 작았지만, 비교적 분자량이 큰 toluene은 25℃에서 0℃와 -30℃까지의 온도변화에 따라 파과시간이 80 min에서 130 min, 260 min으로 증가되어 증가의 차이가 비교적 컸다. 온도 -30℃에서의 파과실험 결과는 온도 25℃와 0℃에 비해 파과시간이 길고 파과시간의 범위도 긴 것을 알 수 있었다. 파과시간

의 순서는 온도 25℃와 0℃의 순서와 비슷한 결과를 보였다.

3.2. 혼합증기의 흡착 및 탈착 특성

주유소에서 배출되는 실제 유증기는 여러 성분의 탄화수소가 혼합된 상태이므로 실제 유증기상태와 유사한 혼합증기를 사용하여 실온(25℃)에서의 흡-탈착특성을 고찰하였다.

혼합증기는 9성분인 pentane, benzene, hexene, hexane, toluene, ethylbenzene, xylene, octane, 그리고 nonane을 각각 혼합하여 혼합증기를 제조하였다. 온도 25℃에서 각 증기농도는 500 ppmv으로 조절하여 혼합하고, 공기유량 2 L/min, 활성탄 2 g을 사용한 실험조건으로 Fig. 1의 실험장치를 사용한 흡착 및 탈착실험을 수행하여 흡착특성은 Fig. 5에 탈착특성은 Fig. 6에 비교하여 나타내었다. 실험에 사용한 혼합증기의 흡-탈착특성은 A그룹(pentane, hexene, hexane), B그룹(benzene, toluene), C그룹(octane, ethylbenzene, xylene, nonane), 3그룹으로 구분할 수 있었다. Fig. 5의 흡착특성을 보면, 흡착 초기부터 경쟁흡착에 의해 제일 처음 A그룹의 증기에서 roll up 현상이 일어나고, 그 다음에는 B그룹의 증기에서 roll up 현상이 일어났으며, 마지막으로 C그룹 증기의 roll up 현상이 일어나면서 흡착되는 현상을 볼 수 있었다. 따라서 유증기와 같이 여러 성분으로 구성된 혼합증기일 경우 실제 활성탄에 흡착하는 물질은 대부분

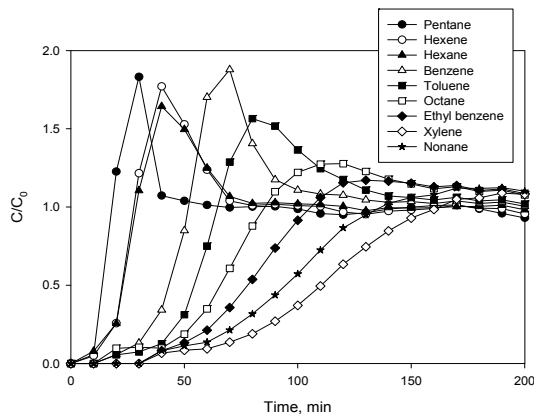


Fig. 5. Comparisons of adsorption curves of 9 kinds vapors included in the mixed vapor on activated carbon at 25 °C (each vapor concentration, 500 ppmv; air flow rate, 2 L/min; activated carbon, 2 g).

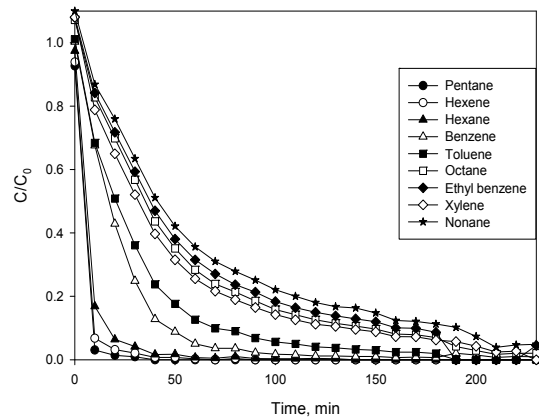


Fig. 6. Comparisons of desorption curves of 9 kinds vapors included in the mixed vapor from activated carbon at 25 °C (each vapor concentration, 500 ppmv; air flow rate, 2 L/min; activated carbon, 2 g).

이 C그룹의 물질임을 알 수 있었다. 상대적으로 분자량이 적은 A, B그룹의 물질은 흡착 초기부터 C그룹의 물질과 경쟁흡착에서 치환되어 탈착되면서 파과곡선에서 roll up 현상을 보였으며, 적은 양만이 흡착된 것으로 판단되었다. Fig. 6의 탈착특성을 보면, A그룹 증기의 탈착이 먼저 마무리되고 그 다음 B그룹 증기, 그리고 C그룹 증기 순서로 탈착이 마무리됨을 볼 수 있었다. A그룹 증기는 경쟁흡착에서 상대적으로 활성탄과 친화력이 크고 분자량이 큰 C그룹 증기에 치환되어 흡착이 거의 되지 않아 탈착량이 적음을 볼 수 있었고, 흡착된 물질은 대부분이 C그룹 증기인 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

유증기를 구성하는 대표적인 10종류 증기를 각각 사용하여 온도 -30°C ~ 25°C에서 활성탄 흡착특성을 고찰하였다. 파과실험의 결과를 Thomas model에 대입하여 구한 파과곡선은 온도 -30°C ~ 25°C에서 본 연구의 파과실험결과를 잘 묘사하였다. 각 증기의 파과시간 크기는 각 물질의 분자량, 밀도, 그리고 증기압과 상관관계가 있었으며, 파과시간은 분자량과 밀도 보다 끓는점 (boiling point)과 상관관계가 더 컸다. 파과곡선의 기울기와 Thomas model식의 속도상수(k) 값은 비례관계에 있었으며, 파과곡선의 기울기가 클수록 속도상수 값이

컸고, 기울기를 가장 큰 성분이 가장 적은 흡착량(q_e)을 나타내었다. 실제 유증기 상태와 유사한 혼합증기를 사용하여 실온(25°C)에서의 흡-탈착특성을 고찰하였다. 혼합증기는 9성분으로 A그룹(pentane, hexene, hexane), B그룹(benzene, toluene), C그룹(octane, ethylbenzene, xylene, nonane), 3그룹으로 구분하여 고찰한 경우에 상대적으로 분자량이 적은 A, B그룹의 물질은 흡착 초기부터 C그룹의 물질과 경쟁흡착에서 치환되어 탈착되며 파과곡선에서 roll up 현상을 보였다. A그룹 증기는 경쟁흡착에서 상대적으로 활성탄과 친화력이 크고 분자량이 큰 C그룹 증기에 치환되어 흡착이 거의 되지 않아 탈착량이 적음을 볼 수 있었고, 흡착된 물질은 대부분이 C그룹 증기인 것을 확인할 수 있었다.

참고문헌

Chue, K., Park, Y. K., Jeon, J. K., 2004, Development of adsorption buffer and pressure swing adsorption (PSA) unit for gasoline vapor recovery, Korean J. Chem. Eng., 21(3), 676-679.
 Khan, F. I., Ghoshal, A. K., 2000, Removal of volatile organic compound from polluted air, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 13, 527-545.
 Lee, M. G., Lee, S. W., Lee, S. H., 2006a, Comparison of vapor adsorption characteristics of acetone and toluene

- based on polarity in activated carbon fixed-bed reactor, *Korean J. Chem. Eng.*, 23(5), 773-778.
- Lee, S. W., Cheon, J. K., Park, H. J., Lee, M. G., 2008, Adsorption characteristics of binary vapors among acetone, MEK, benzene, and toluene, *Korean J. Chem. Eng.*, 25(5), 1154-1159.
- Lee, S. W., Kam, S. K., Lee, M. G., 2007, Comparison of breakthrough characteristics for binary vapors composed of acetone and toluene based on adsorption intensity in activated carbon fixed-bed reactor, *J. Ind. Eng. Chem.*, 13(6), 911-916.
- Lee, S. W., Kwon, J. H., Kang, J. H., Na, Y. S., An, C. D., Yoon, Y. S., Song, S. K., 2006b, Adsorption characteristics of toluene vapor according to pore size distribution of activated carbon, *J. Environ. Sci.*, 15(7), 695-699.
- Lee, S. W., Na, Y. S., An, C. D., Lee, M. G., 2012a, Comparison of adsorption and desorption characteristics of acetone vapor and toluene vapor on activated carbons according to pore structure, *J. Environ. Sci.*, 21(10), 1195-1202.
- Lee, S. W., Na, Y. S., An, C. D., Lee, M. G., 2012b, Comparison of desorption characteristics of water vapor on the types of zeolites, *J. Environ. Sci.*, 21(12), 1463-1468.
- Lee, S. W., Na, Y. S., Kam, S. K., Lee, M. G., 2013, Effect of temperature, pressure, and air flow rate on VOCs desorption gasoline vapor recovery, *J. Environ. Sci.*, 22(9), 1131-1139.
- Popescu, S., Joly, J. P., Carre, J., Danatou, C., 2003, Dynamic adsorption and temperature-programed desorption of VOCs (toluene, butyl acetate and butanol) on activated carbons, *Carbon*, 41, 739-748.
- San Miguel, G., Lambert, S. D., Graham, J. D., 2001, The regeneration of field-spent granular-activated carbon, *Wat. Res.*, 35(11), 2740-2748.
- Shie, J. L., Lu, C. Y., Chang, C. Y., Chiu, C. Y., Lee, D. J., Liu, S. P., Chang, C. T., 2003, Recovery of gasoline vapor by a combined process of two-stage dehumidification and condensation, *J. Chin. Inst. Chem. Engrs.*, 34(6), 605-616.
- Thomas, H. C., 1944, Heterogeneous ion exchange in a flowing system, *J. Am. Chem. Soc.*, 66, 1664-1466.