

원통형 활성탄 카트리지가 내 폐활성탄의 휘발성 유기화합물 저온 탈착 특성

강신욱¹, 이성우¹, 손두정¹, 한문조¹, 이태호², 홍성오^{1,*}

¹주식회사 우진에너지 기업부설연구소
13215 경기도 성남시 중원구 둔촌대로 545
²승실대학교 화학공학과
06978 서울특별시 동작구 상도로 369

(2020년 12월 13일 접수; 2020년 12월 24일 수정본 접수; 2020년 12월 28일 채택)

Characteristics of Low Temperature Desorption of Volatile Organic Compounds from Waste Activated Carbon in Cylindrical Cartridge

Sin-Wook Kang¹, Seongwoo Lee¹, Doojeong Son¹, Moonjo Han¹, Tae Ho Lee², and Sungoh Hong^{1,*}

¹R&D Center, Woojin Co., Ltd
545, Dunchon-daero, Jungwon-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do 13215, South Korea
²Department of Chemical Engineering, Soongsil University
369, Sangdo-ro, Dongjak-gu, Seoul 06978, South Korea

(Received for review December 13, 2020; Revision received December 24, 2020; Accepted December 28, 2020)

요 약

본 연구에서는 도장 공정에서 사용된 폐활성탄을 원통형 카트리지에 충전하여 저온 가스에 의한 탈착 특성을 파악하였다. 폐활성탄의 탈착유량을 결정하기 위하여 활성탄의 톨루엔 흡착 및 탈착 실험을 진행하였다. 실험결과에서 1, 2, 4 m³ min⁻¹의 유량으로 탈착을 하였을 때 높은 THC 농도와 탈착시간에 의하여 2 m³ min⁻¹이 적절하다고 판단하였다. 폐활성탄은 탈착시간 초기에 가스성분에서 비점이 낮은 2-butanone과 MIBK (methyl isobutyl ketone)가 높은 비율로 발생되었고, 그 이후에는 THC의 농도가 감소하면서 BTX계열이 상대적으로 높은 비율로 탈착되었다. 폐활성탄의 탈착시간 동안 발생하는 가스 성분의 총 열량은 316 kcal kg⁻¹로 나타났다. 폐활성탄을 이용하여 톨루엔으로 5회 반복 재생한 결과에서는 요오드가 및 비표면적이 신탄에 비하여 상대적으로 낮은 것으로 분석되었다. 원통형 카트리지 2개를 직렬로 연결한 탈착실험에서는 최대 THC농도가 약 470 ppm으로 나타났다.

주제어 : 폐활성탄, 저온 탈착, 활성탄 재생, THC, VOCs

Abstract : In this study, the waste activated carbon used in the painting process was filled into a cylindrical cartridge and the characteristics of desorption by low temperature gas were investigated. Adsorption and desorption experiments of toluene with activated carbon were conducted to determine the flow rate of desorption. In an experiment where desorption was performed while changing conditions at flow rates of 1, 2 and 4 m³ min⁻¹, it was determined that 2 m³ min⁻¹ was appropriate due to the high THC concentration and desorption time. In the early stage of the desorption of waste activated carbon, 2-butanone and MIBK (methyl isobutyl ketone) with a low boiling point were generated at a high rate in the gas component, and after that, the concentration of THC decreased and the BTX was desorbed at a high rate. The total calorific value of the gas component generated during the desorption of waste activated carbon was 316 kcal kg⁻¹. From repeating the regeneration of waste activated carbon with toluene five times, it was observed that the iodine value and the specific surface area were relatively lower than that of new activated carbon. In the desorption experiment where two cylindrical cartridges were connected in series, the maximum THC concentration was about 470 ppm.

Keywords : Waste activated carbon, Low temperature desorption, Activated carbon regeneration, THC, VOCs

* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: binah2@empas.com; Tel: +82-31-745-3341; Fax: +82-31-736-0322

doi: 10.7464/kset.2021.27.1.79 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.

1. 서 론

휘발성 유기화합물(volatile organic compound, VOC)은 증기압이 높아 쉽게 대기 중으로 휘발하는 액상 또는 기체상 유기화합물이며 유기용제 산업, 도장공장 등과 같은 다양한 산업현장에서 발생된다[1,2]. 이러한 휘발성 유기화합물은 오존 전구물질이면서 발암성을 가지고 있어 대기 중에 배출되기 전 적절한 기술로 처리되어야 한다. 휘발성 유기화합물을 제거하기 위하여 활성탄을 이용한 흡착공정이 적용된다[3]. 이 공정에서 사용되는 활성탄은 비영구적으로 일정 시간 사용하게 되면 휘발성 유기화합물을 흡착할 수 없는 폐활성탄이 된다. 이때 새로운 활성탄으로 교체하거나 흡착공정의 유지비용을 절약하기 위하여 폐활성탄을 재생하여 재사용할 수 있다[4].

폐활성탄의 재생을 위해서는 열 가스[4], 마이크로 웨이브[5], 스틱[6] 등의 다양한 방법이 적용되며, 이 중 열 가스를 이용한 방법은 활성탄을 재생을 위해 일반적으로 사용되는 방법이다. 이 방법은 약 800 °C의 고온 가스를 폐활성탄에 공급하므로 활성탄 표면의 피흡착질이 열에너지로 전달받아 탈착되어 재생이 되는 원리이다. 고온 탈착방법은 활성탄 표면 내구성이 저하될 수 있으며 상대적으로 많은 에너지 비용이 소모되는 단점이 있다. 열 가스를 이용한 재생방법은 효율적이고 적절하게 사용하기 위해서는 탈착 유량, 온도 등의 조건을 파악하는 것이 중요하다. 탈착 유량은 활성탄이 위치되어 있는 층을 통과하는 시간을 조절하여 열을 활성탄에 전달하는 시간을 제어할 수 있다. 온도의 경우 활성탄에 흡착된 물질의 비점을 예상하며 온도를 조절하는 것이 에너지 절약에 도움이 될 것이며, 휘발성 유기화합물의 경우 비점이 비교적 낮은 물질(톨루엔 기준, 111 °C)들이다. 휘발성 유기화합물을 주로 흡착한 폐활성탄의 경우 고온으로 상승시켜 재생하는 것보다 상대적으로 낮은 온도를 이용하여 폐활성탄을 재생하는 것이 효율적이다. 또한 활성탄의 내구성을 유지하기 위해서 온도를 감소하는 것이 필요하다. 저온 탈착에 대한 연구는 다양한 연구자에 의해 수행되었지만 폐활성탄의 특성과 흡착된 피흡착질 종류와 농도에 따라 탈착 특성이 상이하여 지속적인 연구가 필요하다[7-9]. 또한 탈착되는 가스의 성분이 파악된다면 자원으로써 사용 가능성을 판단할 수 있다.

본 연구에서는 도장 공정에서 발생하는 휘발성 유기화합물을 제거하기 위해 사용된 폐활성탄을 원통형 카트리지에 충전하여 저온 가스에 의한 탈착 특성을 파악하고자 하였다. 탈착 유량을 결정하기 위하여 신탄을 이용하여 톨루엔 흡착을 진행한 후 유량에 따른 탈착 경향을 파악하였다. 결정된 유량으로 폐활성탄의 탈착을 진행하였으며 발생하는 탈착가스의 성분을 분석하고 사용할 수 있는 열량을 파악하여 활성탄 재생 가능성을 보고자 하였다.

2. 실험방법

2.1. 실험장치의 구성

실험장치는 원통형 활성탄 카트리지에 장착된 반응기를 흡

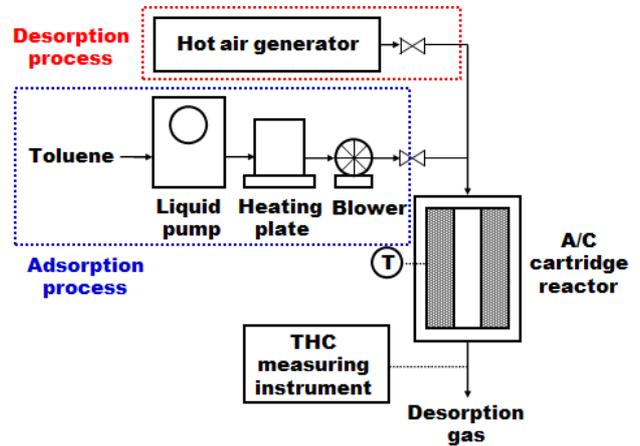


Figure 1. Schematic diagram for adsorption and desorption system of activated carbon.

착 및 탈착운전이 가능하도록 Figure 1과 같이 구성되었다. 원통형 활성탄 카트리지의 직경은 340 mm에 높이가 680 mm이며 중간에 가스가 흐를 수 있도록 140 mm 직경의 공간이 있다. 활성탄 카트리지는 약 25 kg의 활성탄이 충전되었으며 탈착유량 2 m³ min⁻¹ 기준 약 350 mmAq의 압력손실이 발생되었다. 카트리지가 장착되는 반응기는 ø540 mm × 800 mm로 제작되었다. 흡착 운전은 톨루엔 용액을 정량펌프(BT300-2J, Longer precision pump Co., Ltd.)를 이용하여 200 °C로 유지되는 챔버내에 유입시켜 강제 휘발하여 가스를 발생시키는 방법으로 고안되었다. 탈착운전에 필요한 탈착 가스는 열풍기(EP-20, Eunseong Hotwin, Korea)를 사용하였으며 대기 중의 공기가 히터로 가열되어 200 °C의 온도로 반응기에 유입되도록 하였다. 반응기의 전단과 후단에는 아날로그 온도계를 설치하였다. 실험에 사용된 배관과 반응기는 모두 단열재로 보온하였다.

2.2. 탈착 유량의 결정

탈착 조건의 유량을 결정하기 위하여 다양한 탈착가스의 유량 조건에서 톨루엔 흡착 및 탈착 실험이 진행되었다. 흡착운전은 정량펌프를 이용하여 톨루엔 용액을 1.08 kg hr⁻¹의 속도로 챔버내로 유입시켰다. 유입된 톨루엔은 200 °C의 온도에 의해 강제 휘발되어 가스상 톨루엔이 생성되며 2시간 동안 1.62 m³ min⁻¹의 가스 유량으로 원통형 활성탄 카트리지에 장착된 반응기에 유입하였다. 이때 활성탄 카트리지에 충전된 활성탄은 신탄(4 mm Pellet, 요오드가 1,000 이상, 제일탄소)으로 사용되었다. 톨루엔의 흡착이 완료된 활성탄은 탈착가스의 유량을 1, 2, 4 m³ min⁻¹으로 하여 탈착을 총 탄화수소(total hydrocarbon, THC)를 측정하였다. 실험 조건은 Table 1에 요약하여 나타내었다.

2.3. 폐활성탄의 탈착

폐활성탄의 탈착 실험을 진행하기 위해서 A사의 알루미늄 표면 도장공정에서 배출되는 휘발성 유기화합물을 제거하는데 사용된 폐활성탄(4 × 8 mesh)을 수거하여 실험에 사용하였다.

Table 1. Summary of experimental conditions used in in this study

Condition	Value		
Activated Carbon (kg)	25		
Toluene injection flow rate (kg hr ⁻¹)	1.08		
Heating plate temperature (°C)	200		
Adsorption flow rate (m ³ min ⁻¹)	1.62		
Adsorption time (hr)	2		
Desorption temperature (°C)	200		
Desorption flow rate (m ³ min ⁻¹)	1	2	4
Inlet air flow rate (m s ⁻¹)	0.055	0.11	0.22
Inlet air Residence Time (s)	3.08	1.54	0.76

폐활성탄의 탈착을 위한 유량은 2 m³ min⁻¹으로 고정하여 진행되었다. 폐활성탄의 탈착에 의해 발생하는 가스는 유출부에서 실시간으로 THC를 측정하면서 동시에 채취하여 성분을 분석하였다.

2.4. 분석방법

탈착가스에 의해 탈착된 톨루엔 및 탈착가스는 실시간 측정 센서(MK9000, ECOM Co., Ltd., Germany)를 이용하여 THC 농도(propane 교정)를 측정하였다. 탈착가스의 성분분석을 위한 가스 채취는 테들라백을 이용한 샘플러(COS-100, KEMIK Co., Korea)를 사용하였다. 채취된 탈착 가스는 질량분석기가 장착된 가스크로마토그래피(gas chromatography/mass detector, GC/MS, 7820A/5977E, agilent technologies, USA)를 사용하여 스캔 모드로 가스 성분을 정성분석하였다. GC/MS에 사용된 컬럼은 DB-5MS (30 m × 0.25 mm × 0.25 μm)이었으며, 컬럼 유량은 1 mL min⁻¹으로 하였다. 주입구 및 질량분석기의 이온 소스 온도는 200 °C로 설정하였으며, 이온 질량의 수집은 30~300 m z⁻¹으로 범위로 설정하였다. 오븐의 온도는 50 °C에서 250 °C까지 10 °C min⁻¹로 승온시켰다.

활성탄의 물리적 특성을 파악하기 위하여 요오드가, 검조감량, 경도의 평가는 KSM 1802-1985 방법으로 실행되었다. 활성탄의 비표면적은 비표면적측정장치(BELSORP-mini II, BEL Japan, Inc., Japan)를 이용하여 측정하였으며 질소의 흡탈착으로 77 K의 온도에서 진행되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 유량 조건에 따른 탈착 특성

Figure 2는 온도 200 °C의 1, 2, 4 m³ min⁻¹ 탈착 유량으로 톨루엔 단일성분이 흡착된 활성탄 카트리지에 열 가스를 유입하였을 때 시간에 따라 배출되는 THC의 농도를 나타낸 결과이다. 유량에 따른 농도 경향의 차이점은 THC 농도의 최대점을 나타내는 시간과 탈착이 완료되는 시간이다. 탈착 유량 2 m³ min⁻¹의 조건에서는 탈착시간 49 min에 THC가 479 ppm을 나타냈으며 탈착유량 4 m³ min⁻¹의 경우 64 min에서 THC가 160 ppm을 나타냈다. 탈착 유량 1 m³ min⁻¹의 조건에서는 폐활성탄

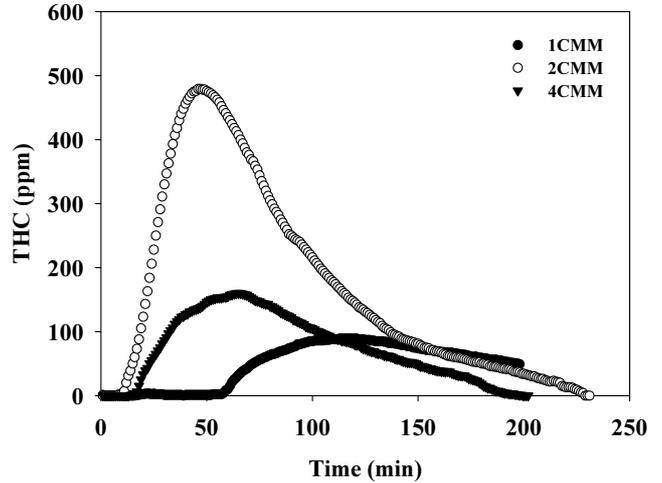


Figure 2. Desorption characteristics of toluene according to the flow rate of a cylindrical cartridge filled with activated carbon.

의 탈착이 상대적으로 느리고 THC의 낮은 농도를 나타냈다. 그리고 2 m³ min⁻¹과 4 m³ min⁻¹의 최대점 THC 농도를 질량단위의 톨루엔으로 환산하였을 때 2 m³ min⁻¹에서의 발생 질량이 상대적으로 1.24배 높은 것으로 확인되었다. 탈착이 완료되는 시간의 경우 탈착가스의 유량이 높을수록 탈착 소요시간도 감소하였다. 탈착시간 및 배출 농도가 상이한 것은 유량에 따른 열가스의 활성탄 접촉시간과 열전달의 차이에 의한 것으로 예상된다. 이와 같은 결과는 활성탄 재생에 적절한 탈착가스의 유량 조건이 있다는 것을 의미한다.

Yoon et al. [7] 및 Kim et al. [8]의 연구에서는 도장공정에서 발생한 폐활성탄을 이용하여 승온속도 조건을 변경하면서 탈착 특성을 파악하였다. 폐활성탄의 탈착은 승온속도가 높아지면서 탈착에 대한 활성화에너지가 감소하므로 빠르게 진행된다고 보고하였다. 본 연구에서는 원통형 활성탄 카트리지에 충전된 폐활성탄을 탈착하기 위한 유량 조건은 탈착가스의 연소 등에 의한 이용 등의 경제성 및 활용성을 감안할 때, 초기에 고농도의 THC를 배출시킬 수 있는 2 m³ min⁻¹이 적절하다고 판단하였다.

Figure 3에서는 톨루엔 단일성분이 흡착된 활성탄 카트리지에 탈착 가스를 공급하면서 동시에 반응기 후단의 온도를 측정 한 결과를 나타내었다. 2와 4 m³ min⁻¹의 유량의 조건에서는 온도상승 결과가 유사한 경향을 나타내었으며 27분까지 100 °C로 급격하게 상승하였다(최대온도 127 °C). 상대적으로 다른 유량에 비해 탈착효율이 낮은 1 m³ min⁻¹의 조건에서는 온도상승이 상대적으로 느렸으며 100 °C까지 상승하는데 53분이 소요되었다. 낮은 탈착유량은 탈착효율이 감소시키는 원인으로 판단된다. 이와 같은 결과는 적절한 탈착 유량을 설정해야 탈착 효율을 높일 수 있는 것을 의미한다. 공급되는 가스의 온도가 200 °C에 비하여 반응기 후단의 가스의 온도가 낮은 이유는 폐활성탄 및 피흡착질에 전달되는 열에너지 소모와 반응기 및 배관에 일부 열손실로 인한 것으로 예상된다.

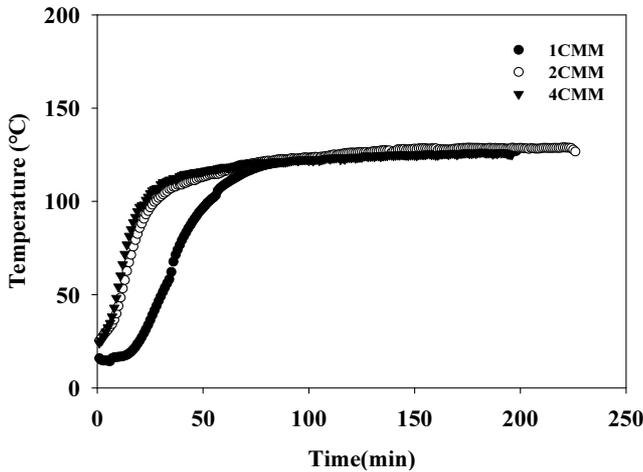


Figure 3. Characteristics of temperature according to the flow rate of a cylindrical cartridge filled with activated carbon.

3.2. 탈착가스의 조성 및 성분

Figure 4에서는 3.1절에서 결정된 $2 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ 의 탈착유량으로 폐활성탄이 충전된 원통형 카트리지의 탈착 가스 성분의 비율과 THC의 농도를 시간에 따라 나타내었다. 탈착가스 THC의 농도 경향은 3.1절의 톨루엔의 탈착경향과 유사한 것으로 나타났다. 탈착가스의 성분은 비점이 낮은 순서대로 탈착이 시작되면서 상대적으로 높은 성분비율로 배출되는 것으로 확인되었다. 시간에 따른 가스 성분 비율을 확인하였을 때 상대적으로 탈착 시작 후 8분에는 케톤(ketone)계 유기물질인 2-butanone (동의어, methyl ethyl ketone)와 MIBK (methyl isobutyl ketone)가 높은 비율로 배출되었고 두 성분의 합은 약 74.4%이었다. 탈착 20분 후 THC 농도 약 280 ppm으로 최대치로 측정되었으며 2-butanone와 MIBK가 65.3%의 비율로 나타내었다. 그리고 방향족 탄화수소인 toluene, ethylbenzene, o-xylene 성분의 합은 약 22.2%를 나타냈다. 이후 THC 농도가 서서히 감소하였고, 2-butanone 및 MIBK 두 성분의 비율도 점차 감소하여 실험 시작 약 90분때에는 두 성분의 합이 39.1%로 낮아지면서 동시에 THC의 농도도 지속적으로 감소하였다.

정성 분석된 탈착가스의 휘발성 유기화합물의 성분은 다른 산업의 도장공정에서 배출되는 성분과 유사한 것으로 나타났다. Kim et al. [1]의 연구는 광주지역 산업단지 내의 도장시설에서 발생하는 휘발성 유기화합물의 배출특성을 평가하였다. 배출된 휘발성 유기화합물의 종류는 acetone, 2-butanone, toluene, benzene, ethyl benzene, o-xylene, 2-propanol 등이었다. Yang et al. [2]의 연구에서는 조선소의 도장시설에서 분석된 휘발성 유기화합물의 종류가 n-butanol, octane, toluene, ethyl benzene, o,m,p-xylene, methyl isobutyl ketone 등으로 본 연구에서 확인되었던 종류와 유사하였다.

Figure 5는 탈착가스의 휘발성 유기화합물 성분비와 농도를 가정하여 시간에 따른 연소 열량으로 환산하여 나타내었다. Figure 4를 활용하여 탈착가스 내 휘발성 유기화합물의 농도는 동일한 시간에 측정된 THC를 톨루엔으로 환산하였다. 그리고 가스 내에 차지하는 총 휘발성 유기화합물의 농도라고 가정하

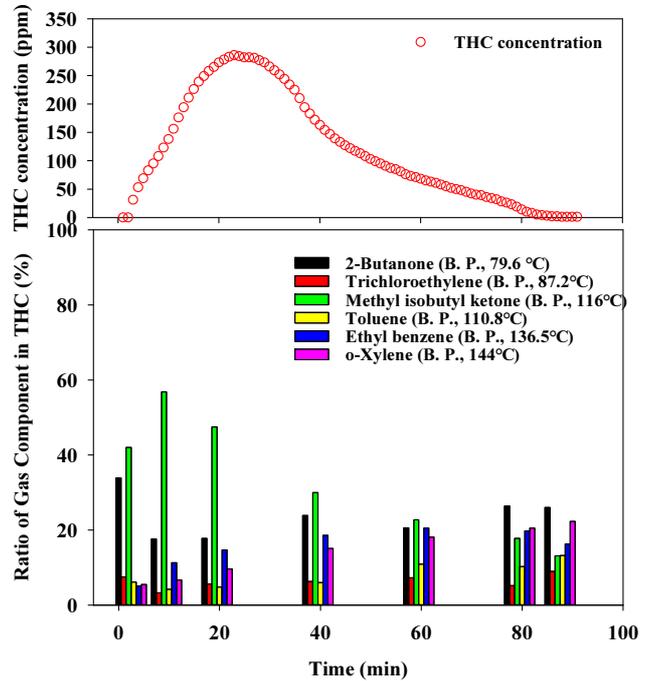


Figure 4. Characteristics of desorption gas component and THC concentration in cylindrical cartridge filled with waste activated carbon over time; Flow rate, $2 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$.

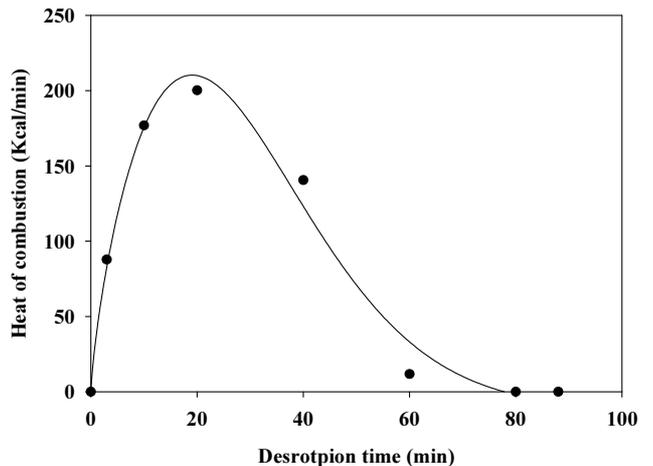


Figure 5. Characteristics of combustion heat of desorption gas over time.

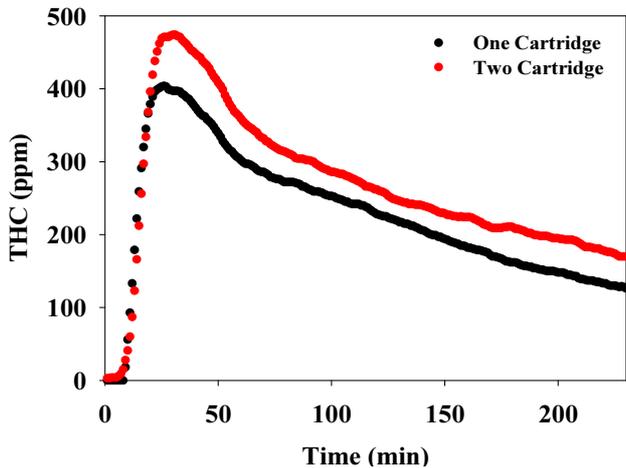
였고, 휘발성 유기화합물의 성분 비율을 각 물질의 연소 열량을 환산하여 총 연소열량으로 나타내었다. 탈착가스 내에 다양한 휘발성 유기화합물은 각각 고유의 연소 열량을 가지고 있으며 본 연구에 사용된 A사의 폐활성탄에서 발생된 탈착가스는 MEK와 MIBK가 주로 높은 성분 비율을 나타냈다. 폐활성탄을 이용한 1회 탈착에서 발생하는 총 연소 열량을 그래프에서 적분하였을 때 탈착가스는 약 316 kcal kg^{-1} 으로 나타났다.

3.3. 재생 활성탄의 물리적 특성

Table 2은 3.2절에서 재생된 폐활성탄을 이용하여 톨루엔 흡착과 탈착을 5회 반복 수행한 후 물리적 특성을 나타내었다.

Table 2. Physical characteristics of activated carbon by 5th regeneration; Adsorption material, Toluene

Regeneration cycle	Iodine Number	Surface area ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$)	Hardness (%)	Loss on drying (%)
1st	165	63	96	0.9
2nd	190	64	98.1	1.3
3rd	157	93	98.2	0.1
4th	176	109	95.5	0.1
5th	166	162	95.2	0.2

**Figure 6.** Characteristics of desorption using serial arrangement of two cylindrical cartridges.

재생된 활성탄의 요오드가는 $144 \sim 176 \text{ mg g}^{-1}$ 의 범위를 나타냈으며 경도는 95% 이상, 건조감량은 최대 1.3%를 나타냈다. 일반적으로 시중에 판매되고 있는 상용 활성탄의 품질을 요오드가 $1,000 \text{ mg g}^{-1}$, 경도 90%, 건조감량 5%로 가정하였을 때 상대적으로 낮았다. 이와 같은 결과는 실험에 사용된 폐활성탄의 성능이 저조한 재생 활성탄이었을 가능성이 있다는 것을 의미한다. 경도와 건조감량은 상용활성탄과 유사한 것은 $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 저온으로 탈착을 진행하여 활성탄의 구조 파괴를 최소화했다고 판단된다. 재생이 반복될수록 BET가 증가하는 이유는 톨루엔의 탈착과 동시에 비점이 높은 잔여 피흡착질이 탈착되면서 발생하는 현상으로 판단된다.

3.4. 원통형 카트리지가 직렬 복수 배치에 따른 탈착 특성

Figure 6는 직렬로 연결된 원통형 카트리지 2개의 폐활성탄 탈착 특성을 나타낸 결과이다. 2개의 원통형 카트리지를 이용한 결과 탈착을 진행한 결과 1개를 이용했을 때보다 높은 약 470 ppm의 최대 THC농도를 나타냈다. 이와 같은 결과는 유량을 고정하여 폐활성탄을 탈착할 때 2개를 이용하여 한번에 많은 양을 처리할 수 있다는 것을 의미한다. 또한, 탈착가스의 직접적인 에너지 자원으로써의 활용에 대한 가능성을 높여주는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 도장공정에서 발생하는 휘발성 유기화합물을 제

거하기 위하여 사용이 완료된 폐활성탄을 원통형 카트리지에 충전하여 저온 가스에 의한 탈착 특성을 파악하고자 하였다. 연구결과를 통하여 얻어진 결과는 다음과 같다.

폐활성탄 탈착을 위해서 적절한 유량 선정이 필요하며 탈착 가스의 직접적인 에너지 활용을 위해서 $2 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ 의 유량이 적절하다고 판단하였다. $2 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ 의 유량으로 폐활성탄을 탈착한 결과 비점이 낮은 휘발성 유기화합물부터 높은 성분비율로 탈착이 진행되며 총 316 kcal kg^{-1} 의 연소 열량을 이용할 수 있는 가스가 발생 되었다.

온도 $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 가스를 이용하여 폐활성탄을 5회 반복 재생한 결과 요오드가는 일반적인 상용활성탄의 물리적 특성 기준에 비하여 낮지만 경도와 건조감량은 성능을 유지하여 활성탄의 구조 파괴를 최소화 한 것으로 판단된다. 2개의 활성탄 카트리지를 이용하여 효율적으로 폐활성탄을 탈착할 수 있으며 직접적인 에너지 활용 가능성을 보여주었다.

감사

본 연구는 2020년도 환경기술개발사업(2019000140003)의 지원을 받아 수행한 결과입니다.

References

- Kim S. H., Seo, D. J., Kim, H. R., Park, J. H., Lee, K. W., Bae, S. J., and Song, H. M., "Estimation and Analysis of VOCs Emissions from Painting and Printing Facilities in Industrial Complexes of Gwangju," *J. Env. Sci. Intern.*, **29**(5), 479-494 (2020).
- Yang, S. B., Yu, M. S., and Woo, K. B., "A Case Study on the Measurement Volatile Organic Compounds and Total Hydrocarbon Concentrations in Block Paint-SHops at a Shipyard," *J. Env. Sci. Intern.*, **25**(8), 1177-1189 (2016).
- Chae, J. S., Jeon, J. M., Lee, T. J., and Jo, Y. M., "Emission Listing of Volatile Organic Compounds (VOCs) Containing Ozone Precursors from Emission Sources in Printing Industries," *J. Odor Indoor Environ.*, **18**(2), 156-166 (2019).
- Wang, H., Jahandar Lashaki, M., Fayaz, M., Hashisho, Z., Phillips, J. H., Anderson, J. E., and Nichols, M., "Adsorption and Desorption of Mixtures of Organic Vapors on Beaded Activated Carbon," *Environ. Sci. Technol.*, **46**(15), 8341-8350 (2012)

5. Liu, X., Yu, G., and Han, W., "Granular Activated Carbon Adsorption and Microwave Regeneration for the Treatment of 2,4,5-trichlorobiphenyl in Simulated Soil-washing solution," *J. Hazard. Mater.*, **147**(3), 746-751 (2007).
6. Verougstraete, B., Martín-Calvo, A., Perre, S. V., Baron, G., Finsy, V., and Denayer, J. F., "A New Honeycomb Carbon Monolith for CO₂ Capture by Rapid Temperature Swing Adsorption Using Steam Regeneration," *Chem. Eng. J.*, **383**, 123075 (2020).
7. Yoon, S. M., Kim, J. Y., Park, K. Y., Yoon, S. K., Kil, I. S., Park, H. J., and Rhee, Y. W., "Investigation on Desorption Reaction and Heating Value of Used Activated Carbons Collected from VOC adsorption Towers," *Clean. Technol.*, **16**(1), 33-38 (2010).
8. Kim, J. Y., Yoon, S. M., Park, K., Yoon, S. K., Kil, I. S., Park, H. J., and Rhee, Y. W., "Investigation on Desorption Characteristics of VOCs Adsorbed on used Activated Carbons Collected from Painting Process," *Korean Chem. Eng. Res.*, **48**(6), 752-756 (2010).
9. Kwon, S. C., Yoon, S. M., Kim, J. Y., Choi, J. H., Kil, I. S., Han, M. H., and Rhee, Y. W., "Reaction Characteristics of Activated Carbons Reprocessed at Low Temperature," *J. Odor Indoor Environ.*, **10**(4), 175-179 (2011).