

시화반월산업단지 활성탄 공동재생시스템 적용을 위한 활성탄 흡착탑 개선에 따른 환경적 효과분석

최여진^{1,3}, 이영우^{2,*}, 정구희³, 김덕현⁴, 박승준^{5,*}

¹한국산업기술대학교 지식기반에너지대학원

15073 경기도 시흥시 산기대학로 237

²충남대학교 응용화학공학과

34134 대전광역시 유성구 대학로 99

³시흥녹색환경지원센터

15073 경기도 시흥시 산기대학로 237

⁴경기과학기술대학교

15073 경기도 시흥시 경기과기대로 269

⁵한국산업기술대학교 생명화학공학과

15073 경기도 시흥시 산기대학로 237

(2021년 3월 24일 접수; 2021년 4월 19일 수정본 접수; 2021년 4월 19일 채택)

A Study on the Environmental Effects of Improvement of Activated Carbon Adsorption Tower for the Application of Activated Carbon Co-Regenerated System in Sihwa/Banwal Industrial Complex

Ye Jin Choi^{1,3}, Young Woo Rhee^{2,*}, Gu Hoi Chung³, Duk Hyun Kim⁴, and Seung Joon Park^{5,*}

¹Graduate School of Knowledge-Based Technology & Energy, Korea Polytechnic University

237, Sangidaehak-ro, Siheung-si, Gyeonggi-do, 15073, Korea

²Graduate School of Energy Science and Technology, Chungnam National University

99, Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34134, Korea

³Siheung Green Environment Center

237, Sangidaehak-ro, Siheung-si, Gyeonggi-do, 15073, Korea

⁴Gyeonggi College of Science and Technology

269, Gyeonggigwagidae-ro, Siheung-si, Gyeonggi-do, 15073, Korea

⁵Department of Chemical Engineering & Biotechnology, Korea Polytechnic University

237, Sangidaehak-ro, Siheung-si, Gyeonggi-do, 15073, Korea

(Received for review March 24, 2021; Revision received April 19, 2021; Accepted April 19, 2021)

요 약

본 연구에서는 시화반월산업단지에서 보편적으로 사용하고 있는 일반형 활성탄흡착탑과 활성탄 공동재생시스템 적용을 위해 개발된 카트리지형 활성탄흡착탑으로 개선하여 얻게 되는 환경적 효과분석을 고찰하였다. 일반형 활성탄흡착탑 4개소와 카트리지형 활성탄흡착탑 2개소를 선정하여 사용하고 있는 활성탄의 물성특성을 분석하고 환경오염물질의 저감효율을 비교 분석하였다. 그 결과, 카트리지형 활성탄 흡착탑에 사용되는 활성탄은 요오드흡착력 800 mg g⁻¹ 이상의 양질의 활성탄으로 확인되었으며 교체주기내에서 양호한 수준으로 활성탄 흡착능이 유지되는 것으로 확인되었다. 환경오염물질 저감효율 분석 결과 카트리지형 활성탄 흡착탑의 경우 THC (Total Hydrocarbon), toluene 및 MEK (Methylethylketone) 성분의 처리효율이 각각 71%, 77% 및 80%로 좋은 처리효율을 보인 것으로 확인되었다. 일반형 활성탄 흡착탑은 처리효율이 매우 낮아 배출오염

* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: sjpark@kpu.ac.kr; Tel: +82-31-8041-0618, Fax: +82-31-8041-0629

ywrhee@cnu.ac.kr; Tel: +82-42-821-5688; Fax: +82-42-822-7286

doi: 10.7464/ksct.2021.27.2.160 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.

물질을 처리하는 방지시설로서의 역할을 제대로 하지 못하고 있었다. 일반형 활성탄 흡착탑을 카트리지형 활성탄 흡착탑으로 개선하여 운영 시 배출오염물질을 저감시킬 수 있을 것으로 판단된다.

주제어 : 활성탄, 활성탄 흡착탑, 카트리지형 활성탄 흡착탑, 공동재생시스템

Abstract : This study investigated the environmental effects of improving the general-type activated carbon adsorption tower used at the Sihwa/Banwol Industrial Complex with use of a cartridge-type activated carbon adsorption tower for the application of an activated carbon co-regenerated system. Four general-type activated carbon adsorption towers and two cartridge-type activated carbon adsorption towers were selected to analyze the properties of activated carbon and to compare the efficiency of reducing environmental pollutants. The results showed that the activated carbon used in the cartridge-type activated carbon adsorption towers was high quality activated carbon with an iodine adsorption force of more than 800 mg/g and that a good adsorption performance was maintained within the replacement cycle. From an analysis of the environmental pollutant reduction efficiency, it was confirmed that the cartridge-type activated carbon adsorption tower functioned properly as a prevention facility for handling emissions pollutants with a treatment efficiency of total hydrocarbons (THC), toluene, and methylethylketone (MEK) components of 71%, 77%, and 80%, respectively. The general activated carbon adsorption tower, which was confirmed to use low-performance activated carbon, had a very low treatment efficiency and did not function properly as a prevention facility for dealing with emission pollutants. It is believed that it is possible to reduce pollutants during operations by changing from the general-type activated carbon adsorption tower to a cartridge-type activated carbon adsorption tower.

Keywords : Activated carbon, Activated carbon adsorption tower, Cartridge-type activated carbon adsorption tower, Co-regeneration system

1. 서론

휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs)은 대기 중으로 쉽게 증발되는 탄화수소화합물의 총칭으로 대부분의 산업단지 제조업종에서 다양한 종류로 배출되고 있다[1]. 시화반월산업단지의 휘발성유기화합물을 오염물질로 배출하는 사업장에서는 다양한 형태의 방지시설을 운용하고 있으며 그중 가장 많이 사용하고 있는 시설은 활성탄 흡착탑이다[2-3].

시화반월산업단지 내에는 약 2만 여개의 업체가 가동 중에 있고, 이중 약 2,000여개의 업체가 대기 및 악취 배출업체로 등록되어 있다. 대기 및 악취방지시설의 약 35%가 활성탄 흡착탑을 운영하고 있는데 활성탄 교체주기는 실제 발생하는 휘발성유기화합물 농도를 고려하지 않고 이론적 산출한 경우가 대부분이다[4]. 이에 흡착되지 않고 배기된 휘발성유기화합물로 악취민원을 유발하는 동시에 최근 이슈화되고 있는 초미세먼지의 일부인 유기성미세먼지로 전환되어 대기질도 악화시키고 있다[5].

특히 대기용 활성탄 흡착성능에 대한 법적 기준이 없어 흡착능이 부족한 활성탄을 사용하는 사례가 많이 조사되고 있다. 2020년도에 시흥녹색환경지원센터에서 연구한 보고서에 따르면 36개 사업장의 활성탄 흡착탑의 활성탄 조사 결과 전체의 약 64%의 사업장이 요오드흡착력 400 mg g⁻¹의 낮은 성능의 활성탄을 사용하고 있었으며 요오드흡착력 800 mg g⁻¹ 이상의 활성탄을 사용하고 있는 업체는 전체의 약 11%로 매우 낮은 수준이었다[6]. 이처럼 사업장에서 성능이 낮은 활성탄을 사용하는 이유는 흡착능이 우수한 활성탄을 적용하려면 사업장의 비용부담이 크기 때문이다. 실제로 현재 요오드 흡착력 800 mg g⁻¹ 이상의 흡착능을 가진 활성탄이 kg당 3,300원에 거래되고 있으며 교체주기 3개월의 활성탄 흡착탑 300 m³ min⁻¹을 운영하는 사업장의 연간 활성탄 교체비용은 약 3천만원 수준이

다. 영세중소사업장에서 순수 환경방지시설 운영비용으로 감당하기엔 부담이 되는 가격으로 이에 대한 적절한 대안이 필요한 상황이다[7].

이러한 문제점을 개선하고자 시화반월산업단지에는 시화지구지속가능발전협의회 주관으로 활성탄 공동재생시스템을 도입하였으며 현재 환경에너지센터가 완공되어 사업을 시행 중이다. 활성탄 공동재생시스템은 중소규모 사업장에서 사용하고 있는 활성탄을 수거하여 공동으로 재생하고 폐활성탄을 재생하는 과정에서 발생하는 부산물을 이용하여 신재생에너지를 생산하는 시스템이다. 이 시스템의 목적은 활성탄 교체 등의 방지시설 관리를 체계화하여 대기환경을 개선하고 공동재생시설 운영을 통해 영세중소업체의 환경관리비용의 부담을 최소화하는데 있다.

활성탄 공동재생시스템에 참여하고자 하는 사업장은 활성탄의 교체와 수거가 용이하게 설계된 카트리지형 활성탄 흡착탑을 필수적으로 설치하여야 한다. 카트리지형 활성탄 흡착탑은 흡착탑내 열유체의 흐름을 최적화하여 기존에 벌크형으로 활성탄을 투입하는 방식의 흡착탑보다 오염물질과 흡착제와의 접촉효율이 증가할 수 있게 설계되었다. 또한 규격화된 카트리지를 사용함으로써 공동재생시스템에서 폐활성탄을 재생하는 과정에서의 에너지효율성을 높일 수 있다.

카트리지형 내부에는 흡착능이 우수한 검증된 활성탄이 충전되어 업체에 제공되며 배출농도에 따라 산정된 교체주기에 맞춰 카트리지를 수거한 후 환경에너지센터에서 활성탄을 재생 후 업체에 재공급 된다. 카트리지형으로 활성탄을 공급하게 되면 카트리지별 활성탄의 기록관리가 이루어지며 활성탄흡착탑 성능에 중요한 요소인 활성탄의 흡착능, 활성탄에 흡·탈착되었던 성분 및 활성탄의 재생횟수 등을 확인 할 수 있다. 이처럼 기존에 사업장에서 자체적으로 관리하던 활성탄을 공공기관에서 카트리지형으로 관리할 경우 활성탄의 성능 및 교체주

Table 1. Selected six companies and their basic information

Activated carbon bed Type	Company	Standard industrial classification code (first 2 digits)	Type of industry	Emission capacity ($\text{m}^3 \text{min}^{-1}$)	Replacement period (d)
General bed	A	20	Compound and chemical product	150	270
	B	25	Metal product	350	180
	C	22	Rubber and plastics products	300	60
	D	26	Printed circuit board	550	90
Cartridge bed	E	26	Printed circuit board	250	90
	F	25	Metal product	550	90

기 등이 보다 체계적으로 관리될 것이며 이를 통해 환경적 개선효과를 얻을 수 있을 것으로 기대하고 있다.

본 연구에서는 현재 시화반월산업단지에서 운영 중인 일반형 활성탄 흡착탑의 실태를 파악하고 카트리지형 활성탄 흡착탑으로 개선하여 성능이 보장된 활성탄을 사용할 경우 얻게 되는 환경적 효과를 고찰하였다. 이를 위해 흡착탑 타입별로 사용하고 있는 활성탄의 물성특성과 환경오염물질의 배출특성을 분석하였다.

2. 실험방법

2.1. 조사대상

본 연구에서는 현재 시화반월산업단지에서 보편적으로 사용하고 있는 일반형 활성탄 흡착탑을 가동하는 사업장 4개소와 공동재생사업에 참여하기 위해 개발된 카트리지형 활성탄 흡착탑을 가동하는 사업장 2개소를 대표사업장으로 선정하여 비교분석하였다. 선정된 6개 사업장에 대한 기본정보는 Table 1과 같다. 업종의 구분은 통계청 한국표준산업분류코드에 따라 구분하였으며 사업장별 활성탄 흡착탑 용량 및 교체주기는 대기배출시설 신고필증에 기입된 자료를 참고하였다.

2014년도에 한국수자원공사에서 시행한 전수조사 결과에 따르면 시화반월산업단지에서 가장 많은 활성탄 흡착탑을 사용하고 있는 업종은 금속가공제품제조업(25)과 화학물질 및 화학제품제조업(20)이다. 이 두 업종이 전체의 약 43%를 차지하고 있으며 그 다음으로 고무제품 및 플라스틱제조업(22), 인쇄회로기판제조업(26) 등이 각각 8.7%, 7.8%로 활성탄 흡착탑을 많이 사용하고 있는 것으로 나타났다[8]. 따라서 본 연구에서는 비교대상 사업장을 활성탄 흡착탑을 주로 사용하는 업종을 고려하여 선정하였다. 현재 공동재생시스템 도입이 초기단계여서 카트리지형 활성탄 흡착탑을 사용하고 있는 사업장 수가 매우 한정적이지만 업종 및 연계공정 등을 고려하여 최대한 개선효과를 객관적으로 평가할 수 있는 사업장을 선정하였다.

2.2. 분석방법

선정된 대상 사업장의 조사방법은 개별업체별 현장을 방문하여 우선적으로 담당자 면담을 실시하여 활성탄 흡착탑과 연계된 배출공정에 대한 기본정보와 활성탄 충전량, 종류, 교체주기 등

과 같은 운영에 대한 정보를 조사하였다. 이후 활성탄의 물성특성을 분석하기 위하여 흡착탑 내에 장입되어 있는 활성탄 시료를 100 g 정도 채취하여 실험실에서 활성탄 요오드 흡착력, BET (Brunauer, Emmet Teller), TGA (Thermogravimetric analysis) 분석을 실시하였다.

활성탄 요오드 흡착력은 요오드가로 표현되며 활성탄의 흡착능을 나타내는 대표적인 지표로 흡착력이 높을수록 높은 요오드가를 나타낸다[9]. 요오드 흡착력은 한국공업규격 KS M 1802에 준하여 분석하였다. 모든 시료는 휘발성유기화합물이 제거된 상태에서 물성을 측정하기 위하여 250 °C에서 24 h 열처리 하였다. 활성탄 요오드 흡착력의 경우, 시간에 따른 변화 추이를 확인하기 위해 활성탄 교체주기에 따라 균일한 주기로 사업장별로 6회씩 분석하였다.

BET 분석의 경우 각 사업장에서 수거한 활성탄을 동일한 조건에서 비교하기 위하여 모든 활성탄을 250 °C에서 3 h 동안 가열하여 활성탄에 흡착되어 있는 수분과 휘발성유기화합물을 모두 제거하고 분석하였다. BET 분석 장비로 Microtrac-BEL사의 BELSORP-mini II를 사용하였으며, 비표면적, 세공부피, 평균세공크기를 각각 측정하였다. TGA 분석 장비로 Sinco사의 N-1000를 사용하였으며 10 °C min⁻¹으로 240 °C까지 온도를 증가시켜 온도에 따른 수분과 휘발성유기화합물의 제거 추이를 확인하였다.

추가적으로 활성탄 흡착탑의 실질적인 효율을 확인하기 위하여 THC (Total Hydrocarbon) 분석을 실시하였다. 현장에서 간접흡인상자를 이용하여 포집백(Polyester bag)으로 채취한 시료를 실험실에서 Pollution사의 Polaris FID를 이용하여 분석하였다.

활성탄 흡착탑 타입에 따른 환경오염물질 저감특성을 비교하기 위하여 활성탄 흡착탑의 유입부와 유출부에서 채취한 시료에 대해 복합악취와 휘발성유기화합물 8종을 분석하였다. 복합악취의 경우, 악취방지법의 공정시험방법에 따라 공기희석관능법으로 분석하였으며 현장에서 간접흡입상자를 이용하여 포집백으로 채취한 시료를 실험실로 운반한 후 무취공기로 희석하여 평균정답율이 0.6 미만일 경우 시험을 끝내고 냄새 감지 한계 희석배수를 구하는 방법으로 분석하였다. 휘발성유기화합물의 경우, 고체흡착관에 채취하여 실험실로 운반한 후 저온농축 및 열탈착의 전처리를 거쳐 GC/MS (Agilent Technologies,

Table 2. Iodine value change according to analysis period of activated carbon for the six companies

Activated carbon bed Type	Company	Iodine value of analysis period (mg g ⁻¹)					
		Initial	1st (1/5 AP*)	2nd (2/5 AP)	3rd (3/5 AP)	4th (4/5 AP)	5th (1 AP)
General bed	A	227	148	-	145	-	132
	B	-	409	157	109	107	126
	C	-	425	265	170	173	131
	D	-	89	-	-	-	-
Cartridge bed	E	901	764	798	810	773	609
	F	858	812	813	783	747	676

(*) AP: analysis period

Table 3. BET analysis results of the six activated carbons

Activated carbon bed Type	Company	S _{BET} ^a (m ² g ⁻¹)	V _p ^b (cm ³ g ⁻¹)	d _p ^c (nm)
General bed	A	257	0.13	1.98
	B	34	0.31	3.75
	C	11	0.01	3.14
	D	69	0.04	2.05
Cartridge bed	E	877	0.43	1.94
	F	805	0.38	1.89

a: BET specific surface area; b: Total pore volume; c: Average pore diameter

5973N)를 이용하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 활성탄 물성특성 분석 결과

Table 2는 조사대상 6개 사업장에 대한 활성탄의 요오드 흡착력을 주기별로 분석한 결과 값이다. 분석주기는 각 사업장의 활성탄 흡착탑의 활성탄 교체주기를 1로 가정했을 때 1/5이 경과한 시점을 기준으로 결정하였다. 예를 들어 교체주기가 180일인 사업장의 경우 1/5 분석주기는 36일이 된다.

먼저, 일반형 활성탄 흡착탑을 사용하고 있는 4개 사업장을 비교하면, A사업장의 경우 초기 장입되는 활성탄의 요오드흡착력이 227 mg g⁻¹으로 분석되었으며 B ~ D사업장의 경우 초기 장입되는 활성탄을 분석하지 못했으나 500 mg g⁻¹ 이하로 예측된다. 2012년 환경부 보고서에 따르면 활성탄 요오드 흡착력이 최소 800 mg g⁻¹ 이상이 되어야 설계조건에 따라 오염물질의 제거효과가 충분하다고 제안한 바 있다[10]. 따라서 A ~ D사업장에 장입된 활성탄은 활성탄의 기능을 기대할 수 없는 수준이라 판단된다.

A ~ C 사업장 모두 활성탄을 교체하고 새로운 교체시점이 도래하기 1/5 ~ 3/5 시점부터 활성탄의 요오드 흡착력이 100 mg g⁻¹ 수준으로 떨어졌기 때문에 이후 3개 사업장의 교체주기 준수는 의미가 없는 것으로 판단된다. D 사업장의 경우 주기적인 요오드 흡착력 데이터를 확보하지 못했으나 초기에 분석된 요오드 흡착력이 89 mg g⁻¹으로 매우 낮은 수준으로 이후 활성

탄의 요오드 흡착력도 낮은 수준으로 유지될 것을 추측된다.

카트리지형 활성탄 흡착탑을 사용하고 있는 E와 F사업장을 비교하면, 두 사업장에 초기 장입된 활성탄의 요오드흡착력은 각각 901 mg g⁻¹, 858 mg g⁻¹로 매우 높은 수준의 요오드 흡착력을 보이고 있다. E사업장의 경우 교체주기 1/5시점에 요오드 흡착력이 초기 장입 시점대비 약 15% 낮아졌으며 이후 4/5시점까지 유지되다 교체주기 직전엔 장입 시점대비 약 32% 낮아진 것을 확인하였다. F사업장의 경우 교체주기 2/5시점까지 요오드 흡착력이 장입 시점대비 약 5% 낮아진 상태로 유지되었으며 이후 조금씩 저하되어 교체주기 직전에는 약 21% 낮아졌다. 두 사업장 모두 교체주기는 3개월로 교체주기 직전에 측정된 요오드 흡착력은 각각 609 mg g⁻¹, 676 mg g⁻¹으로 교체주기 내에서 양호한 수준의 활성탄 흡착성능을 유지하는 것으로 확인되었다.

Table 3은 활성탄의 기공구조를 확인하기 위해 BET 비표면적(m² g⁻¹), 세공부피(cm³ g⁻¹), 평균세공크기(nm)를 분석한 자료이다. 활성탄의 흡착효율은 활성탄의 표면과 내부에 생성되어 있는 미세한 세공구조에 영향을 가장 많이 받는 것으로 알려져 있으므로 정확한 세공구조에 대한 정보를 아는 것은 매우 중요하다[11].

먼저, BET 비표면적의 경우, 양질의 활성탄을 사용하고 있는 것으로 보인 E ~ F 사업장의 경우 800 m²/g 이상으로 분석되었으며 A ~ D 사업장은 상대적으로 낮은 비표면적 값이 분석되었다. 요오드 흡착력이 높은 활성탄이 비표면적도 역시 높게 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. 활성탄 요오드흡착력과

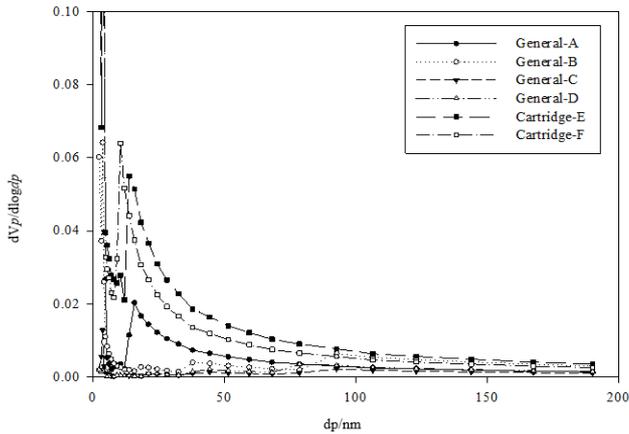


Figure 1. BJH-Plot of the activated carbons for the six companies.

BET 비표면적의 상관관계는 2020년도 시흥녹색환경지원센터 연구를 통해 보고된 바 있다. 이 보고서에 따르면 요오드가 흡착능이 높은 활성탄은 비표면적도 높게 나타나며 활성탄 스펙을 규정하기 위해 요오드가와 비표면적 중 하나만 제시해도 가능하다고 보고하였다[12].

세공부피의 경우에도 요오드흡착력과 상관성을 보일 것으로 기대하였으나 B사업장의 경우 낮은 요오드흡착력을 가지고 있

음에도 불구하고 넓은 세공부피로 분석되었다. 요오드흡착력과 세공부피와의 상관성은 좀 더 세밀한 연구가 필요할 것으로 보인다.

세공크기와 활성탄 성능과의 관계를 분석하기 위해 Figure 1 과 같이 세공크기별 직경에 대한 부피값($dV_p/d\log dp$)으로 BJH (Barret, Joyner, and Halenda)-Plot을 나타내었다. IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry)에서는 기공구조를 가지고 있는 물질들의 세공크기를 20 nm 이하를 micropore, 20 ~ 500 nm 이하를 mesopore, 500 nm 이상을 macropore로 분류하고 있다[13]. 분석 결과를 보면, 활성탄의 요오드 흡착력이 낮은 활성탄을 사용하는 B ~ D 사업장의 활성탄의 세공크기는 거의 없는 것으로 나타났으며 요오드 흡착력이 높은 활성탄을 사용하는 E와 F 사업장의 세공크기는 대부분 5 ~ 40 nm 인 것으로 분석되었다. 활성탄의 성능이 좋을 수록 micropore 가 우세하게 분포되어 있으며 활성탄 성능과의 상관성도 매우 높은 것으로 판단된다.

Figure 2는 일반형 활성탄 흡착탑을 사용하고 있는 사업장의 활성탄의 탈착특성을 비교하기 위해 TGA 실험을 한 결과이다. TGA 결과는 각 활성탄 마다 초기무게를 100% 기준으로 설정하여 무게손실량을 %로 나타내었다. 그 결과, A ~ D 사업장의 무게손실량은 각각 93.9%, 96.9%, 95.2% 및 89.4%로 나타났다.

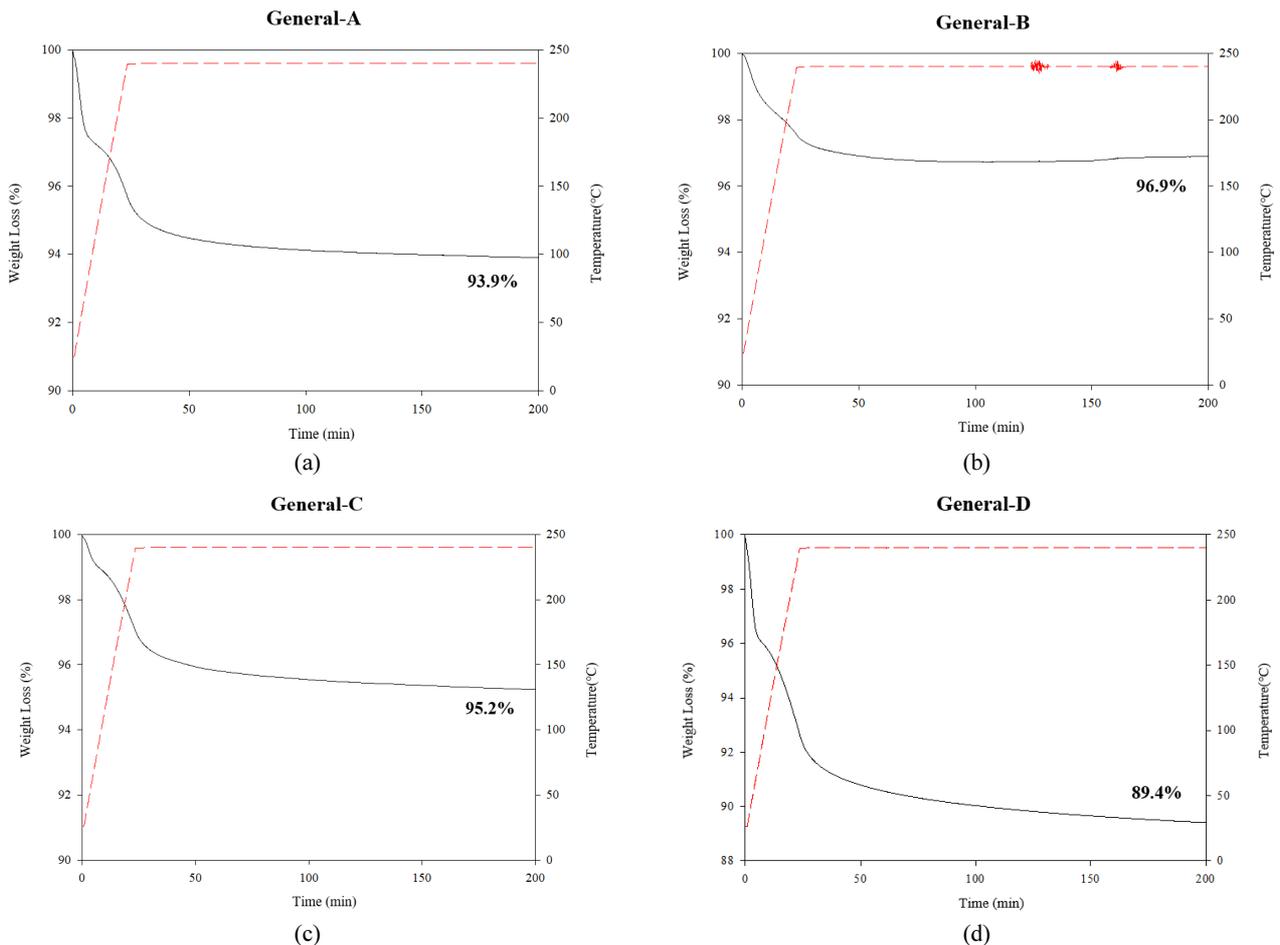


Figure 2. TGA results of the activated carbons for the four general-type companies.

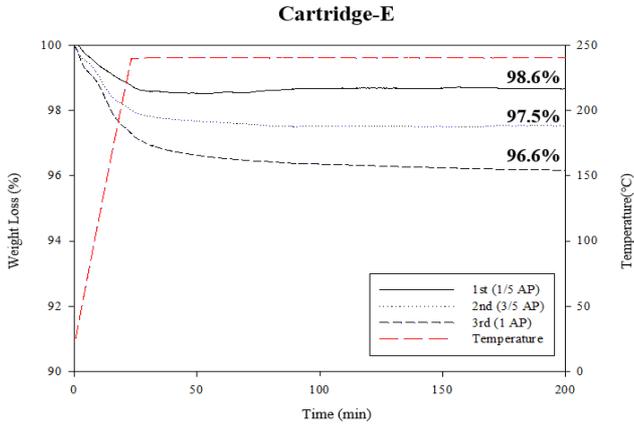


Figure 3. TGA results of the activated carbons for the cartridge-type E company.

A ~ D 사업장의 경우 초기 수분이 제거되는 곡선이 뚜렷하게 나타났으며 240 °C 이후에 무게가 유지되지 않고 서서히 감소되는 것을 확인 할 수 있었다.

카트리지형 활성탄 흡착탑을 사용하고 있는 사업장의 활성탄 TGA는 Figure 3과 같이 E사업장을 대표로 하여 약 15일 간격으로 3차례 분석하였다. 그 결과 초기 무게손실량은 98.6%이며 2차 분석 시 97.5%, 3차 분석 시 96.6%로 일정하게 낮아지는 것을 확인 할 수 있었다. 이는 사업장의 흡착탑 가동시간에 따라 활성탄에 흡착되는 휘발성 유기화합물의 양도 비례하여 증가하는 것을 의미하며, 이로부터 활성탄의 성능이 제대로 발휘되고 있다고 판단할 수 있다.

3.2. 환경오염물질 저감 특성 분석

활성탄 흡착탑 타입별 환경오염물질 현황 및 변화수준을 확인하기 위하여 Table 4와 같이 활성탄 흡착탑의 유입부와 유출부의 복합악취를 분석하였다. 그 결과를 보면 일반형 활성탄 흡착탑을 사용하고 있는 A ~ C 사업장의 경우 유입부의 농도

Table 4. Complex odor at the inlet and outlet of the activated carbon towers for the six companies

Company	Complex odor (dilution factor)		Efficiency (%)
	In	Out	
A	100	120	- 20
B	208	669	- 222
C	669	965	- 44
D	120	120	0
E	173	120	31
F	173	144	17

보다 유출부의 농도가 더 높게 검출되었다. 특히 B와 C 사업장의 경우 유출부의 복합악취 농도가 669배와 965배로 법적기준치인 500배를 초과하고 있는 것으로 나타났다. D사업장의 경우 복합악취 처리효율이 전혀 없는 것으로 나타났다.

카트리지형 활성탄 흡착탑을 사용하고 있는 E와 F 사업장의 경우 복합악취 처리효율이 각각 31%와 17%로 분석되었다. 활성탄 흡착탑의 유입부의 복합악취 농도가 173배로 매우 낮은 수준으로 처리효율이 낮게 평가되었지만 유입부의 농도가 더 높아진다면 처리효율도 높게 평가될 것으로 판단된다.

Table 5는 일반형 흡착탑의 유입부와 유출부에서 채취한 시료에 대한 THC와 휘발성유기화합물 분석 결과이다. THC 농도도 역시 A와 C 사업장에서의 처리효율은 10% 미만으로 매우 미미한 처리효율을 보이고 있으며 B와 D사업장에서는 유출부의 농도가 유입부의 농도보다 높은 역전현상이 나타났다. 특히 B사업장의 경우 유출부의 농도가 유입부의 농도보다 2배 이상 높게 배출되고 있었다. A사업장의 휘발성유기화합물의 농도는 대부분 역전되는 것이 확인되었으며 MEK (Methy ethyl ketone) 성분만 49%의 처리효율을 보였다. B사업장의 경우도 대부분의 휘발성유기화합물의 농도가 역전현상을 보였으며 styrene 성분만 27%의 처리효율을 보였다. C와 D사업장은 toluene 성분만

Table 5. VOCs analysis results at the inlet and outlet of the activated carbon towers for the four general-type companies

Component	A			B			C			D		
	In	Out	%	In	Out	%	In	Out	%	In	Out	%
THC	2,084	1,897	9	94	218	-133	691	648	6	32	53	-66
Benzene	0.3	27.4	-7,959	ND			ND			ND		
Toluene	62	1,142	-1,751	8,189	15,562	-90	4,486	1,880	58	8	0	96
p-Xylene	ND			541	1,731	-220	ND			1	6	-415
m-Xylene	ND			1,190	3,559	-199	ND			2	31	-1,863
o-Xylene	ND			541	1,731	-220	ND			1	17	-2,095
Styrene	ND			44	32	27	ND			3	13	-412
EA	12	36	-193	808	3,321	-311	44,634	51,446	-15	21	32	-52
MEK	8	4	49	1,281	3,035	-137	140	359	-156	50	48	3
MC	23,994	22,176	8	ND			ND			27	77	-185

Unit: THC: ppm; Others: ppb, ND: Not detected
 THC: Total hydro carbons; EA: Ethylacetate; MEK: Methyl ethyl ketone; MC: Methylenechloride

Table 6. VOCs analysis results at the inlet and outlet of the activated carbon towers for the two general-type companies

Component	E			F		
	In	Out	%	In	Out	%
THC	65	19	71	10	5	48
Benzene	ND			ND		
Toluene	18	4	77	13	4	68
p-Xylene	ND			ND		
m-Xylene	ND			ND		
o-Xylene	ND			ND		
Styrene	0.5	0.4	22	ND		
EA	ND			9	1	89
MEK	76	15	80	5	1	80
MC	ND			8,450	4,028	52

Unit: THC: ppm; Others: ppb, ND: Not detected
 THC: Total hydro carbons; EA: Ethylacetate; MEK: Methylketone; MC: Methylenechloride

Table 7. Estimation results of total emissions amount for major emission component

Component	Unit	A	B	C	D	E	F
Complex odor	OU/sec	300	3,903	4,825	1,100	500	1,320
THC	g/h	12,195	3,270	8,331	1,249	205	119
Toluene		42	1,344	139	ND	0.3	0.6
EA		2	368	4,884	ND	ND	ND
MEK		0.1	205	20.8	5.10	0.7	ND
MC		757	ND	ND	9.63	ND	504

ND: Not detected;
 THC: Total hydro carbons; EA: Ethylacetate; MEK: Methylketone; MC: Methylenechloride

각각 58%, 96%의 처리효율을 보이는 것으로 나타났으며 나머지 모든 성분은 유출부의 농도가 더 높게 분석되었다.

4개 사업장 모두 전반적인 휘발성유기화합물의 처리효율은 매우 낮으며 이를 통해 현재 저질의 활성탄이 장입된 일반형 활성탄 흡착탑은 배출오염물질을 처리하는 방지시설로서의 역할을 제대로 하지 못하고 있다고 판단된다.

카트리지형 활성탄 흡착탑을 사용하고 있는 E와 F 사업장의 활성탄 흡착탑 유입부와 유출부에서 분석한 THC와 휘발성유기화합물 분석결과를 Table 6에 나타내었다. 두 사업장의 결과를 보면 모든 성분에서 양호한 처리효율이 있는 것으로 확인되었다. E사업장의 경우 THC 처리효율이 71%로 매우 양호하게 나타났으며 toluene과 MEK 성분 역시 77%와 80%로 좋은 처리효율을 보인다. F사업장의 경우 THC 처리효율은 48%로 높은 효율은 아니지만 toluene, EA, MEK와 MC 모두 양호한 처리효율을 보이는 것이 확인되었다. 이러한 결과를 봤을 때 성능이 검증된 활성탄이 장입된 카트리지형 활성탄 흡착탑은 배출오염물질을 처리하는 방지시설로서의 역할을 충분히 수행하고 있다고 판단된다.

활성탄 흡착탑 타입에 따른 오염물질의 배출량 및 저감효과를 평가하기 위해 Table 7과 같이 주요 배출물질별 배출량을 산정하였다. 배출량은 오염물질의 배출농도와 각 사업장의 활

성탄 흡착탑 배출가스 유량을 이용하여 산정하였다. 먼저, 복합악취의 배출량 결과에 따르면 일반형 활성탄 흡착탑을 사용하고 있는 C사업장의 배출량이 4,825 OU/sec로 가장 크게 나타났으며 A사업장의 배출량이 300 OU/sec로 가장 낮게 나타났다. THC의 배출량을 비교했을 경우, A사업장의 배출량이 12,195 g hr⁻¹로 가장 크게 나타났으며 F사업장의 배출량이 119 g hr⁻¹로 가장 낮게 나타났다.

각각의 사업장에서 배출되는 오염물질의 농도 범위와 방지시설 처리용량이 상이해 상대비교를 하기엔 무리가 있지만 문제점을 도출하기에는 충분히 의미 있는 자료라고 판단된다. 일반형 활성탄 흡착탑과 카트리지형 활성탄 흡착탑의 좀 더 면밀한 상대비교를 위해서는 배출되는 농도수준이 비슷한 사업장에 대한 정밀분석이 추가적으로 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 일반형 활성탄 흡착탑과 카트리지형 활성탄 흡착탑의 사용 활성탄의 물성특성 및 환경오염물질의 배출특성을 조사하였다. 일반형 활성탄 흡착탑의 활성탄의 요오드 흡착력의 수준은 대부분 기준치에 못미치는 것으로 나타났으며 주기별 요오드 흡착력 분석결과를 통해 법적요체주기 준수는

의미가 없는 것으로 확인되었다. 카트리지형 활성탄 흡착탑에 사용되는 활성탄은 요오드 흡착력 800 mg g⁻¹ 이상의 양질의 활성탄인 것으로 확인되었으며 교체주기내에서 양호한 수준으로 활성탄 흡착능을 유지하는 것으로 확인되었다. BET 분석 결과, 요오드흡착력이 낮은 활성탄의 경우 micropore가 거의 없는 것으로 나타났으며 요오드흡착력이 높은 활성탄의 경우 세공크기는 대부분 5 ~ 40 nm인 것으로 확인되었다.

활성탄 흡착탑 타입에 따른 환경오염물질 저감특성을 분석한 결과, 성능이 낮은 활성탄을 사용하고 있는 일반형 활성탄 흡착탑 사업장의 복합악취 및 휘발성유기화합물의 처리효율은 거의 없는 것으로 나타났으며 이는 방지시설로서의 역할을 전혀 수행하고 있지 않음을 의미한다.

성능이 검증된 활성탄을 사용하고 있는 카트리지형 활성탄 흡착탑 사업장의 환경오염물질 처리효율은 매우 양호하였다. 이는 카트리지형 활성탄 흡착탑으로 변경하여 검증된 활성탄을 사용할시 오염물질의 배출을 상당 수준 저감할 수 있으며 이를 시화반월산업단지 활성탄 흡착탑 사용사업장 전체에 확대적용 시 매우 높은 환경개선효과를 얻을 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

감사

이 연구는 2020년 시흥녹색환경지원센터의 연구비를 지원받아 연구되었습니다.

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. Kim, J. Y., Yoon, S. M., Park, K. I., Yoon, S. K., Kil, I. S., Park, H. J., and Rhee, Y. W., "Investigation on Desorption Reaction Characteristics of Used Activated Carbons Collected from Manufacture of Rubber and Plastics Products," *Korean J. Odor Res. Eng.*, **9**(3), 151-156 (2010).
3. Yu, S. A., Cho, J. H., Park, J. Y., and Rhee, Y. W., "Adsorption and Desorption Characteristics of Binary-component Volatile Organic compounds (Toluene-MEK) on Activated Carbon," *Clean Technol.*, **23**(4), 421-428 (2017).
4. Rhee, Y. W., "Efficiency Evaluation of Activated Carbon Beds Operated on Shihwa/Banwal Industrial Complex," Siheung Environmental Technology Development Center (2007).
5. 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), 784-790 (2010).
6. Rhee, Y. W., "A Study on the Improvement of Air Quality by Investigating the Properties of Activated Carbon used in Absorption Tower by the Representative Industries of Sihwa Industrial Complex," Siheung Environmental Technology Development Center, (2020).
7. 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 (2009).
8. Korea Water Resources Corporation, Survey on all air emission companies of Sihwa Banwol Industrial Complex, Korea (2014).
9. Lee, S. W., Moon, J. C., Lee, C. H., Choi, D. H., Ryu, D. C., and Song, S. K., "Variation of Pore Structure of Coal-based Activated Carbon with Burn-off of Steam Activation," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **22**(12), 2141-2148 (2000).
10. The Department of the Environment, Preparation of a certification system and standards for odor prevention facilities, Korea, (2012)
11. Lee, S. W., Bae, S. K., Kwon, J. H., Na, Y. S., An, C. D., Yoon, Y. S., and Song, S. K., "Correlations Between Pore Structure of Activated Carbon and Adsorption Characteristics of Acetone Vapor," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **27**(6), (2005).
12. Rhee, Y. W., "A Study on the Improvement of Air Quality by Surveying the Physical Properties of Activated Carbon Used in Absorption Towers of Sihwa Industrial Complex," Siheung Environmental Technology Development Center, (2020).
13. International Union of Pure and Applied Chemistry, Manual of Symbols and Terminology, Appendix 2, Part I, Colloid and surface chemistry, *Pure Appl. Chem.*, **31**, 578 (1972).