Appl. Chem. Eng., Vol. 32, No. 1, February 2021, 91-96
https://doi.org/10.14478/ace.2020.1084

Article

활성탄 흡착탑의 실용화를 위한 최적 유동특성 선정 및 열처리 조건에 따른 황화수소 포집능 향상 연구

장영희 · 김봉환* · 김성수,†**

경기대학교 일반대학원 환경에너지공학과, *경남과학기술대학교, **경기대학교 환경에너지공학과
(2020년 10월 14일 접수, 2020년 12월 28일 심사, 2021년 1월 18일 채택)

Investigation of Optimum Condition of Heat Treatment and Flow to Improve H_2S Adsorption Capacity for Practical use of an Activated Carbon Tower

Younghee Jang, Bong-Hwan Kim* and Sung Su Kim,†**

Department of Environmental Energy Engineering, Graduate School of Kyonggi University, Suwon, 16227, Republic of Korea
**Department of Automotive Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology, Jinju, 52725, Republic of Korea*
***Department of Environmental Energy Engineering, Kyonggi University, Suwon, 16227, Republic of Korea*
(Received October 14, 2020; Revised December 28, 2020; Accepted January 18, 2021)

초 록

본 연구에서는 다양한 환경 공정에서 사용되는 황화수소 제거용 흡착탑 효율을 향상시키기 위해 유동 분석 및 흡착성능 향상 연구를 수행하였다. 연구를 위해 상업적으로 이용 가능한 다양한 활성탄에 칼륨(potassium, K)을 담지하여 개질 활성탄을 제조하였다. 또한 열처리 여부에 따라 흡착 성능과 열처리 과정에서 변화된 표면 특성 사이의 높은 상관관계를 고찰하고자 하였다. 함침법을 통해 K로 코팅된 활성탄은 57배 이상의 흡착 성능을 확인하였다. 이는 균일한 기공 형성과 탄소 표면의 K의 강한 결합은 황화수소의 화학적 및 물리적 흡수에 기여한다고 판단하였다. 다양한 상용 활성탄의 표면 구조에 대한 SEM 분석은 열처리를 통한 표면 특성의 변형으로 인해 기공 구조가 파괴되어 흡수 성능이 저하되는 것으로 확인하였다. 각 활성탄의 압력 손실 특성은 입자 크기와 모양에서 가장 낮은 압력 손실이 관찰되었다. 따라서 2~4 mesh 크기의 탄소입자 범위와 불규칙한 모양이 흡착탑의 성능을 향상시키고 경제적 효율성을 확보할 수 있다고 제안하였다.

Abstract

This study was conducted to improve the operating conditions of an adsorption tower filled with potassium impregnated activated carbon for high hydrogen sulfide capture capacity. Heat treatment modified the surface properties of activated carbon, and ultimately determined its adsorption capacity. The activated carbon doped with potassium showed 57 times more adsorption at room temperature than that of using the raw adsorbent. It is believed that uniform pore formation and strong bonding of the potassium on the surface of carbon contributed to the chemical and physical absorption of hydrogen sulfide. The SEM analysis on the surface structure of various commercial carbons showed that the modification of surface properties through the heat treatment generated the destruction of pore structures resulted in the decrease of the absorption performance. The pressure drop across the activated carbon bed was closely related with the grain size and shape. The optimum size of irregularly shaped activated carbon granules was 2~4 mesh indicating economical feasibility.

***Keywords**: Hydrogen sulfide, Adsorption, Potassium, Pressure drop, Commercialization*

1. 서 론

전 세계적으로 산업이 발달함에 따라 다양한 환경오염문제가 발생하고 있으며, 각종 산업시설에서 배출되는 대기오염물질들은 분진, 미스트, 유해가스 및 악취 등으로 그 종류가 다양해지고 있다[1]. 특히 악취는 환경오염물질 중 감각공해물질로서 산업공정과 주거공간에서 모두 발생하기 때문에 인간이 직접적으로 불쾌감을 나타내는 대표적인 대기오염물질이다[2,3]. 이에 따라 국내 환경관련 지자체에서는 대기유해물질로 분류되는 악취물질 등 환경 문제에 관한 법적 규제가 강화되는 움직임이 활발한 추세이다. 국가에서 규제하는 22가지 악취유발물질 중 황화수소(hydrogen sulfide, H_2S)는 매립시설, 하・폐수

† Corresponding Author: Kyonggi university,
Department of Environmental Energy Engineering, Suwon, 16227, Republic of Korea
Tel: +82-31-249-9741 e-mail: sskim@kyonggi.ac.kr

pISSN: 1225-0112 eISSN: 2288-4505 @ 2021 The Korean Society of Industrial and Engineering Chemistry. All rights reserved.

Table 1. Human Hazards according to Concentration of Hydrogen Sulfide[5-6]

Concentration (ppm)	0.3	3~5	20~30	100~300	700 이상
Hazards	Smell detection	Unpleasant smell	Lung irritation, tolerable but accustomed to smell	Risk of paralysis and suffocation within 2~15 m of exposure	Immediate respiratory arrest, suffocation death

Table 2. Properties of Activated Carbon Adsorbents

	A	B	C	D	E
Shape					
Size (mesh)	8~30	4~8	4~8 (Assembly type)	3~6	2~4
Apparent density (kg/m^3)	540	570	480	520	500
Porosity	0.52	0.50	0.49	0.54	0.58
	Irregular square (reagent grade)	Irregular square	Irregular cylindrical	Irregular square	Irregular square

처리시설, 혐기조건의 사업시설 등 다양한 분야에서 발생되는 주요 대기오염물질이며[4], 위와 같이 배출원이 다양할 뿐 아니라 발생되는 농도범위 또한 매우 폭넓기 때문에 배출 농도에 맞는 처리 기술 적용이 필수적이다. 산업안전보건법에서는 황화수소를 작업장 유해물질로 규정하고 8 h 가중 평균치 10 ppm, 단기간 노출허용농도 15 ppm 이하인 환경에서만 작업하도록 규제하고 있는데, 그 이유는 Table 1과 같이 폭넓은 농도 범위에서 생명체와 산업시설에 악영향을 미치고 있기 때문이다[5,6].

각 산업공정에 따라 운전조건 및 배출공정이 다르기 때문에 황화수소를 제거하기 위해서는 다양한 현장에 적용할 수 있는 적절한 처리 방법의 선정이 중요하며[7,8], 그 중에서도 흡착법 주력 악취제거 기술로 알려져 있다. 흡착법이란 오염물질을 물리 · 화학 흡착하여 제거하는 기술로, 비교적 처리 비용이 저렴하며 특정물질에 대한 독성을 보이지 않는다는 장점이 있어 낮은 농도, 간헐적 배출공정에 많이 적용되고 있다[9,10]. 활성탄을 이용한 흡착법은 황화수소의 농도 및 각종 부하에 대한 유연성 그리고 낮은 처리비용으로 다양한 흡착제들 중 가장 많이 이용되고 있다. 그러나 크게 두 가지의 문제점을 가지고 있어 이를 보완하고자 하는 연구가 다수 수행되고 있다. 첫째, 탈착물을 포함한 2차 오염물의 발생이다. 모든 흡착제의 숙명이기는 하나 흡착법은 흡착제가 흡착할 수 있는 절대량이 존재하고, 특히 활성탄(activated carbon, AC)은 재생 사용의 어려움이 있기 때문에 흡착효율을 증진시키기 위한 소재 개질 연구가 계속적으로 수행되어야 한다. 둘째, 활성탄이 충진된 흡착탑은 과다한 압력손실, 높은 분진 발생률 등의 문제가 있으므로 실 공정에서의 흡착탑의 효율을 극대화하기 위해 압력손실을 최소화하고 높은 접촉면접을 갖는 최적 운전조건을 선정해야 한다. Choi의 연구(2019)는 다양한 알칼리 금속을 첨착하여 성능 증진을 개선하였고, 비표면적의 증진을 확인하였으며[1], 알칼리 금속의 함량 및 열처리 가스 등 세부적인 제조 조건을 제시하여 비표면적 증진에 따른 성능 증진 개선 연구를 수행하였다[11,12]. 이와 같이 이미 많은 첨착 활성탄 연구가 수행되었으나[13-17], 실제 많은 산 · 염기 처리 및 스팀 공정, 그리고 N_2, He 가스 사용 등의 대량 제조가 어려운 열처리 공정이 수반되어야 함에 따라 공정의 경제성이 감소하는 결과를 가져오고 있는 실정이다.

이에 따라 본 연구에서는 개질 활성탄의 상용화를 위하여 다양한 활성탄을 지지체로 하여 K 담지 및 열처리 조건에 따른 황화수소 흡착성능을 비교하고, 흡착 층 유동해석을 통해 압력 손실을 최소화 할 수 있는 활성탄 지지체를 확인하여 경제성, 운전 주기 등을 고려한 최적 활성탄을 선정하고자 하였다. 이는 다양한 물성을 갖는 활성탄이 충진된 lab-scale 활성탄 층을 가로지르는 폐가스의 유동해석을 통해 개질에도 압력 부하가 상승하지 않는 우수한 활성탄-흡착탑 설계조건을 제시하고, 1% 칼륨을 함침시킨 활성탄을 열처리 조건을 단계별로 생략하여 개질 활성탄들의 흡착성능을 비교하였다. 또한 SEM 분석을 통해 공정의 단축이 활성탄 표면에 미치는 영향을 직관적으로 분석하고, 흡착성능과 비교 · 고찰하였다.

2. 실험방법

2.1. 개질 활성탄 제조 및 실험 방법

2.1.1. 흡착소재 제조 방법

본 연구에서는 흡착 공정의 실증화를 위하여 흡착소재의 성능 극대화 및 균일한 흡착성능 확보가 가능한 최적 제조조건을 확인하고자 하였다. 적용한 활성탄은 시약급 활성탄 A (Duksan Co., Korea)와 현재 상용화 되어 있는 활성탄 4가지(B, C, D, E)를 사용하였다. 활성탄의 개질은 첨착 활성금속인 알칼리 물질 K를 담지하는 것이며, KI (Samchun Co., Korea)를 증류수에 혼합 및 교반하여 완전히 용해되었을 때, 40~50 mesh의 크기로 균일하게 파쇄한 활성탄과 혼합하여 1 h 교반하였다. 혼합된 용액을 rotary vacuum evaporator를 이용하여 65 ℃에서 수분을 증발시켰다. 건조된 활성탄은 CO_2로 소성될 수 있는 경계 온도인 400 ℃에서 공기 분위기 하 4 h 열처리하여 최종적인 흡착제를 얻었다[1]. 제조된 각각의 흡착제는 지지체인 상용 활성탄의 종류에 따라 A, B, C, D, E로 구별하였다(Table 2). 또한 지지체로서 사용된 상용 활성탄은 raw로 표기하였고, K의 첨착 후에는 coating, 열처리 후에는 heat으로 표기하였다. 예를 들어, A 활성탄의 경우, 개질 처리하지 않은 활성탄은 raw-A, K를 첨착한 후에는 coating-A, 열처리 후에는 heat-A로 명명한 것이다.

Table 3. Adsorption Heating Test Conditions

Conditions		Value
Particle size (μm)		297~420
Temperature (℃)		25
Inlet gas conc. (N_2 Balance)	O_2 (%)	21
	H_2S (ppm)	250
Adsorbent loadings (g)		0.1
Relative humidity (%)		35
Total flow (cc/min)		400

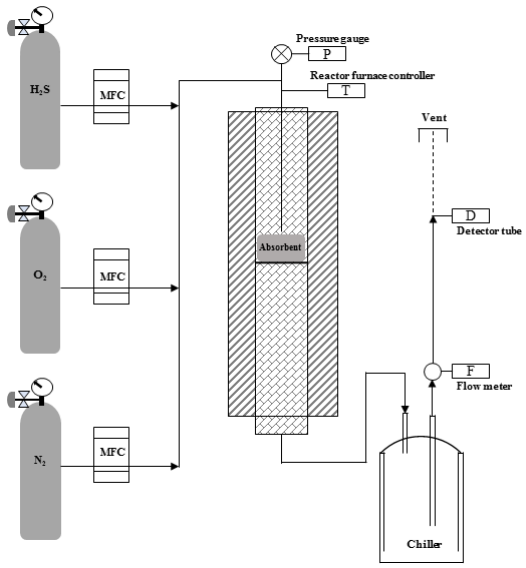

Figure 1. Schematic diagram of H_2S adsorption test reactor.

2.1.2. 흡착성능 실험 방법

본 연구에서 제조한 흡착소재의 흡착성능을 비교하기 위한 실험 장치는 크게 가스주입부분, 흡착반응부분 그리고 흡착 후 가스농도 분석부분으로 구성되어있으며 장치구성을 Figure 1에 나타내었다. 제조된 흡착제는 흡착제층을 고정하기 위해 quartz wool 위에 충진했다. 반응기에 공급되는 가스는 N_2, O_2, H_2S/N_2의 각 실린더로부터 mass flow controller (MFC, MKS Co.)를 통하여 주입하였다. 반응기의 온도는 고정층 상부에 장착된 K-type의 열전대와 PID 온도제어기(Nova Co.)를 이용하여 25 ℃로 조절하였으며, 반응 후 가스는 분석기로 유입되기 전 냉각기를 통해 수분을 완전히 제거하였다. 반응기 후단의 황화수소의 농도는 가스 검지기(GASTEC, GV-100S, JAPAN)를 이용하여 시간에 따른 황화수소 농도값을 측정하였으며, 흡착반응 실험 조건을 Table 3에 나타내었다. 본 연구에서 사용된 흡착제의 성능은 Equation (1)에 따라 계산되며, 검지기에 측정된 황화수소의 농도 범위를 적분하여 단위 흡착제 무게 당 흡착질의 무게(g H_2S/g adsorbent)로 나타내었다.

$$q = \frac{FC_0}{w}[ts - \int_0^{ts} \frac{C_{out}}{C_{in}} dt] = \frac{X}{w}(g/g) \qquad \text{Equation (1)}$$

q: amount of adsorption, H_2S (g/g), F: gas flow (ml/min), C_{in}: inlet concentration, C_{out}: outlet concentration, ts: breakthrough time, w: mass of adsorbent (g), X: mass of adsorbate (g)

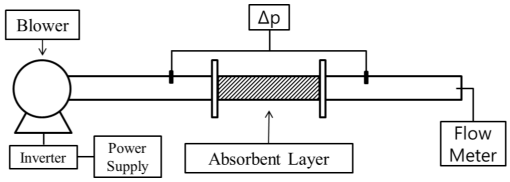

Figure 2. Schematic diagram of pressure drop test reactor.

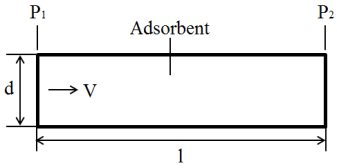

Figure 3. Pressure drop coefficient calculation position by fluid flow.

2.2. 유동특성 평가 방법

본 연구에서는 흡착탑의 압력강하 유동특성 평가를 위하여 다공체 유동모델인 Loss Model을 적용하였으며, 활성탄 흡착제의 2차 저항계수(quadratic resistance coefficients) 값인 *CR2*를 결정하였다. 이를 통해 흡착탑 상용화 시 유량 이동에 의해 발생하는 압력손실 및 소재 파괴를 방지하기 위하여 최적 활성탄 물성을 선정할 수 있다. 본 실험 장치(Figure 2)를 통해 압력강하와 압력손실계수 K_{loss} 값을 계상할 수 있었다. 팬(Fan unit)을 통해 공기(23~25 ℃)가 덕트로 유입하게 되어 시험부(활성탄 흡착제)를 통과하게 된다. 시험부 전후의 압력손실을 측정하기 위해 시험부 입・출구에서 200 mm 떨어진 지점에 압력 취출구(tap)를 설치하였고, 차압계(differential pressure transmitter)를 이용하여 압력강하를 계측하였다. 덕트의 전체 길이는 1,000 mm로, 본 실험의 작동조건은 전면유속을 0~2.86 m/s로 설정하였다.

또한 absorbent layer 장치(Figure 3)의 단위 길이당 압력손실계수는 K_{loss}로 명명하고 관로의 압력손실에 관한 Darcy-Weisbach 방정식과 유사한 Equation (2)를 이용하였으며[18,19,25], 이는 유체(공기) 흐름에 따른 유입구와 배출구의 압력 차, 유체(공기)의 밀도 및 속도를 이용하여 계산한 식이다.

$$\Delta P = P_1 - P_2 = K_{loss} \cdot l \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2} \rightarrow K_{loss} = \frac{2 \cdot \Delta P}{l \cdot \rho \cdot V^2} \qquad \text{Equation (2)}$$

K_{loss}: 1 m당 손실계수, l: 흡착층 길이(m), V: 통과 평균유속(m/s), ρ: 공기밀도(kg/m^3)

또한, CFX 유동해석을 위한 Loss Model의 2차 저항계수 *CR2*는 Equation (3)과 같이 손실계수와 유체(공기)의 밀도의 관계식을 이용하여 계산하였다.

$$CR2 = K_{loss} \cdot \rho/2 \qquad \text{Equation (3)}$$

CR2: 2차 저항계수, K_{loss}: 1 m당 손실계수, ρ: 공기밀도(kg/m^3)

Table 4. Adsorption Capacities of Activated Carbon

Adsorbent	Raw	Coating	Heat
A	0.00062	0.035732	0.0138
B	0.00031	0.00312	0.01247
C	0.00047	0.02496	0.01963
D	0.01038	0.00249	-
E	0.00004	0.00006	-

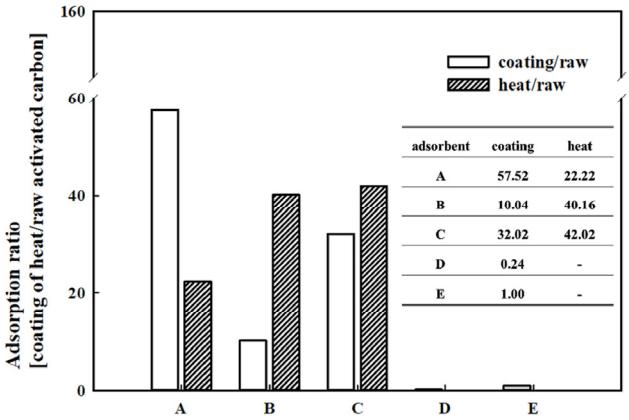

Figure 4. Ratio of adsorption of activated carbon to adsorption of modified activated carbon (Experimental condition : H_2S 400 ppm, O_2 21%, R.H. 0%, catalyst loading: 1.5 g).

2.3. 표면 분석

제조한 소재의 표면 상태, 균일성 및 기공 변화 등을 관찰하기 위하여 FE-SEM (field emission scanning electron microscopy, Scinco Co., JSM-6500F) 분석을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 열처리 단계의 영향

본 연구에서는 개질 활성탄의 용이한 상용화를 위하여 제조 공정 중 열처리 및 알칼리 금속 첨착 공정을 단계별로 생략하여 제조하였으며 각 활성탄의 흡착성능을 Table 4에 나타내었다. 또한 Table 4의 결과를 이용하여 개질된 활성탄이 일반 활성탄의 흡착성능 대비 향상된 비율을 확인하고자 다음과 같이 각 흡착성능을 비율로 나타내었다. 비율은 다양한 활성탄 지지체에 알칼리 금속 첨착 후 열처리 유 · 무에 따라 제조된 활성탄이 raw 활성탄 대비 증진되는 흡착성능 비율을 Figure 4에 나타내었다. Choi *et al.*[1]의 연구결과 또한 탄소기반 흡착제의 경우 기공구조의 변형/파괴를 최소화함이 필요하나, SEM 분석 결과를 통해 활성물질의 첨착을 통한 화학적 활성화를 위해서는 불활성 기체를 이용한 열처리가 필요하다고 주장하였다. 그러나 이는 산업적으로 대량 활성탄을 불활성 기체로 열처리하기 불리하여 성능 증진된 개질 활성탄을 적용할 수 없는 상황에 처해있음에 따라, 산소가 포함된 공기 또는 열처리 미진행에 의해 증진될 수 있는 활성탄 지지체를 선정하는 것이 최적이라고 판단하였다. 그 결과, 기존 활성탄은 평균 약 0.0004 g/g의 흡착성능을 가지고 있음을 확인하였다. 더불어 A, B, C 흡착제의 경우 효율 증진으로 널리 알려져 있는 알칼리 금속인 K를 담지하였을 때 열처리를 하지 않아도 흡착성능이 57.52, 10.04, 32.02배 증진되었음을 확인하였다. 그러나 D, E 흡착제의 경우 활성탄을 담지하였을 때 오히려 성능의 감소가 이루어짐을 관찰할 수 있었으며 E의 경우 아무런 흡착성능을 나타나지 않아 유사한 비표면적을 갖는 상용 활성탄의 흡착인자가 존재할 것으로 판단하였다. Kwon의 연구(2005)에 따르면, 각 활성탄의 평형 흡착량은 BET 비표면적과 일정한 상관관계를 가진다고 볼 수 없음을 보고하였고, 오히려 세공구조가 주요 흡착인자임을 주장하였다[20]. 이는 본 연구에서 사용된 활성탄 5종 또한 유사한 비표면적을 가지고 있으나, 세부적인 세공 구조가 상이할 수 있고, 이에 따라 흡착성능의 차이가 발생 또는 우수한 흡착성능을 갖는 피흡착물이 다를 수 있다고 판단하였다. 특히 첨착된 각 활성탄을 공기 조건에서 열처리하였을 때, A 소재는 기존 57배 증진되었던 0.0357 g/g의 흡착량이 약 35% 감소한 0.0138 g/g의 흡착량을 가짐을 확인하였다. B, C 흡착제의 경우 약 30% 증진된 0.0125 g/g, 0.0196 g/g의 흡착량을 확보하여 열처리 후 흡착성능이 더욱 증진됨을 확인하였다. 또한 D, E 소재의 경우 열처리를 수행하였을 때 완전히 소성되어 실험을 수행하지 못하였다. 열처리온도인 400 ℃는 활성탄이 CO_2로 산화될 수 있는 경계온도임과 동시에 활성탄 표면의 활성점이 손상되지 않고 성능의 증진이 가능한 온도범위이기도 하다. 따라서 소성된 개질 활성탄은 활성점 손상 및 해당 온도에서의 열처리 산화가 발생할 수 있는 낮은 내구성을 확인하였으며, 개질 활성탄 지지체로서 적합하지 않다고 판단하였다.

Adib *et al.*[19]의 연구결과에 의하면 열처리 공정을 적용할 때 활성물질이 표면에 고르게 분포할 수 있다고 SEM 등 소재 분석 결과와 함께 확인할 수 있었으며, 이를 포함한 문헌조사 결과 흡착제 충진량 및 열처리 진행에 따라 성능이 증가된 것은 기존 연구결과와 일치함을 확인하였다[21,22]. 이에 따라 본 연구에서는 첨착물질을 첨가하기 위한 최적의 활성탄의 세공 구조가 존재함을 고려하여 각 활성탄 및 개질 단계에 따라 활성탄의 표면 변화를 관찰하고자 하였다(Figure 5). 그 결과, 개질되지 않은 각 활성탄의 표면은 D소재가 가장 많은 기공을 형성하고 있음을 유추할 수 있었으며, 이에 따라 첨착 전 가장 높은 흡착량(0.0104 g/g)을 보유할 수 있음을 판단할 수 있었다. 알칼리 금속인 K를 담지한 후 A는 표면에 알칼리 금속이 집중되어 부착된 형태를 보이고 있었으며, B와 C의 경우 기공 증진을 관찰할 수 있었다. D의 경우 균일하게 분포되어 있던 기공이 타원형을 그리며 기공이 확대됨을 확인하였고 황화수소를 흡착할 수 있는 적정 표면적의 감소가 발생함을 확인하였다. E 또한 알칼리 금속 첨착 후 미세하게 존재하던 기공들이 막히고 큰 기공을 형성하고 있음을 확인하였다. 이 결과는 D와 E의 흡착성능이 미비할 수 있었음을 증명하는 결과로서, 황화수소의 흡착을 위한 적절한 비표면적을 유지해야 함을 판단하였다. 또한, A는 기공의 형성은 관찰되지 않으나 타 활성탄 대비 알칼리 금속인 K가 표면에 다수 형성하고 있음을 확인하였다. 이는 물리적 흡착보다는 화학적 흡착에 의존하여 흡착성능이 증진된 것을 시사한다. 반면에 B, C의 경우 알칼리 금속의 존재보다 기공의 발달을 두드러지게 관찰할 수 있었다. 해당 결과는 열처리를 수행하였을 때 알칼리 금속의 일부가 산화 및 제거되면서 일부 기공이 형성하였으나 A의 경우 K의 산화에 의해 성능의 감소가 이루어졌으며, B, C의 경우 첨착된 알칼리 금속의 안정적 담지로 흡착 성능의 증진이 원활하게 이루어졌음을 판단할 수 있었다. Choi *et al.*[11]의 연구에서도 다양한 입상형 지지체에 따른 소재 특성 분석 및 흡착 활성 변화를 확인하였다. 이는 본 SEM 결과에 따라 각 상용 활성탄 지지체에 따라 형성된 기공 및 기인하고 있는 흡착방법이 상이하다는 것을 확인하였다. 이에 따라 A가 시약급 활성탄임을 고려하였을 때 열처리 공정이 생략된

Table 5. Characteristics of Pressure Loss by Adsorbents Type

	A	B	C	D	E
CR2 ($K_L \cdot \rho/2$)	17,538	4,086	3,010	3,237	983
Flow velocity through 200 mm adsorption bed (V m/s)	0.56	1.25	1.40	1.35	2.45
Pressure loss in 200 mm adsorption layer (△P Pa)	1,100	1,180	1,180	1,180	1,180
Pressure loss coefficient per 1 m (K_{loss} 1/m)	29,600	6,897	5,080	5,464	1,659
CR2 = $K_{loss} \cdot \rho/2$	17,538	4,086	3,010	3,237	983

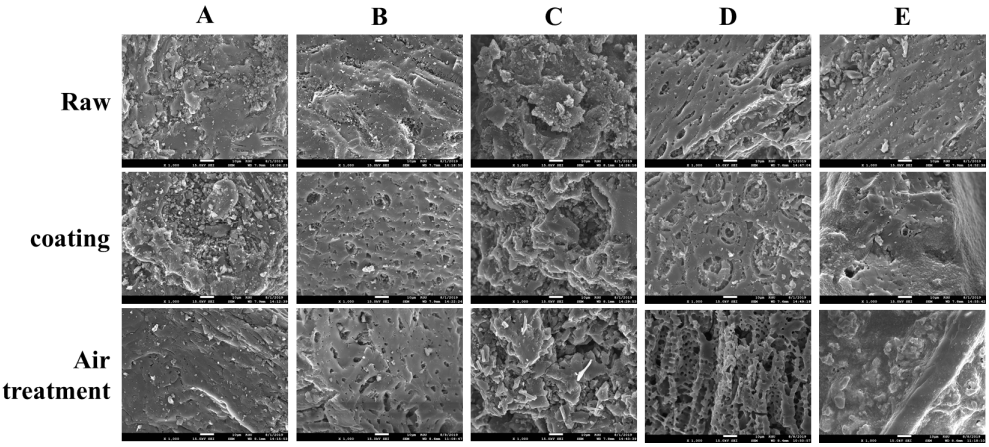

Figure 5. SEM of activated carbon and adsorbents with/without calcination.

고경제성 흡착탑 효율 증진소재에는 B, C 활성탄이 가장 적합할 것으로 판단하였다.

3.2. 유동해석을 위한 활성탄 지지체의 압력손실 특성 비교

본 연구에서는 제조된 개질 활성탄의 상용화를 위하여 각 활성탄별 압력손실 특성을 비교하였다. 예를 들어, E의 압력손실계수는 실험을 통한 활성탄 지지체 입출구에서의 압력 차를 측정하여 앞에서 언급한 Equation (2)에 의해 다음과 같이 계산하였다.

① ρ = 1.185 kg/m^3, d = 0.09 m, l = 0.2 m인 경우,
V = 2.45 m/s, $\triangle P$ = 1180 Pa

$$\therefore\ K_{loss} = \frac{2 \cdot \Delta P}{l \cdot \rho \cdot V^2} = 1659$$

또한 추후 유동해석을 위한 2차 저항계수(quadratic resistance coefficients) 값인 *CR2*는 Equation (3)에 의해 계산할 수 있었다.

② $CR2 = K_{loss} \cdot \rho/2 = 1{,}659 \cdot 1.185/2 \fallingdotseq 983$ kg/m^4

이와 같이 각 활성탄들의 압력손실계수 및 2차 저항계수를 계산한 결과를 Table 5에 나타내었다. 각각의 유동 특성을 확인한 결과 A, B, D, E와 같은 불규칙 각형보다 C와 같은 원통형 조립탄이 압력 손실이 26% 작았다. 그러나 E를 제외한 활성탄은 m당 압력손실계수가 높아 2차 손실계수의 증가를 이끌어 개질활성탄을 적용하기 위한 활성탄의 크기 선별이 필요하다고 판단하였다. 또한 동일한 크기의 활성탄 중 다른 모양(불규칙 각형, 원통형) 활성탄인 B와 C를 비교하였을 때, 원통형인 C의 압력손실이 낮게 측정됨에 따라 원통형 활성탄을 적용할 경우 압력손실의 감소를 이끌어낼 수 있다고 판단하였다. 그럼에도 불구하고 압력손실계수가 증가한 가장 큰 이유는 활성탄의 크기에 기인하는 것이며, 압력손실이 작은 C를 2~4 mesh 크기로 제조할 경우 흡착 성능 증진 및 상용화가 가능할 것으로 판단하였다. 흡착제의 크기는 활성탄의 성능에도 큰 영향을 미친다고 보고되고 있다[1,23].

4. 결 론

황화수소 흡착을 위한 흡착 층 설계의 기초 자료 및 경제성 증진을 위해 다양한 활성탄별 특성에 따른 유동해석 및 최적 개질 레시피의 제조 조건을 단계별로 단축하여 흡착 성능을 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 황화수소 흡착 성능 증진을 위한 표면 개질 물질로 알려진 알칼리 물질 K를 다양한 물성을 갖는 상용 활성탄에 첨착한 결과, A, B, C의 경우 흡착 성능이 최소 10배 이상 증진되었으나, D, E의 경우 성능 증진에 영향을 미치지 않았다. 화학적 흡착 및 물리적 흡착 중 각 활성탄이 의존하는 흡착 특성에 따라 K 담지 후 흡착 성능 변화가 상이함을 SEM 분석을 통해 확인하였으며, 그 중 A의 흡착성능이 열처리 전 raw 대비 약 57배, 열처리 후 약 22배 이상으로 가장 우수하였다.

2. 활성탄별 압력손실 특성을 분석한 결과, 형태 및 크기에 따른 압력손실 변화를 확인하였으며, 원통형 조립이 각형 활성탄 대비 약 28% 감소하였으며, 이를 통해 개질 공정의 단축에도 성능 증진이 가능하고, 원통형 조립인 C 활성탄을 2~4 mesh 크기로 제조하여 적용할 경우 가장 높은 경제성을 갖는 흡착탑 설계가 가능하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2020학년도 경기대학교 대학원 연구원장학생 장학금 지원에 의하여 수행되었음.

References

1. S. Y. Choi, D. H. Han, and S. S. Kim, A study on the optimization of activated carbon adsorbent preparation condition and evaluation of application supporting of K-Fe-Li ternary metal ions for improving adsorption capacity of hydrogen sulfide (H_2S), *Clean Tech.*, **25**(3), 189-197 (2019).
2. G. H. Park, G. Y. Oh, J. H. Lee, K. H. Jung, and S. Y. Jung, Comparison of odor characteristics emitted from the 3 type of sewage treatment plant, *Korean J. Odor Res. Eng.*, **4**(4), 196-206 (2013).
3. S. Han, C. Lee, H. Joo, K. Kim, S. Kim, H. Ryu, J. Lee, H. Kim, and J. Han, Performance assessment of H_2S, NH_3, and VOCs sensors for field application, *J. Odor Indoor Environ.*, **18**(3), 261-271 (2019).
4. S. J. Jeong, A study on the health effect to determine an H_2S emission standard for incinerators, *J. Odor Indoor Environ.*, **15**(2), 119-125 (2016).
5. McGraw-Hill, *Poisoning and Drug Overdose* [cited 2020 Feb. 18], 224-225 (2004).
6. United states department of labor, Safety and topics: hydrogen sulfide [cited 2020 Feb. 18]; Available from: http://www.osha.gov/dts/chemicalsampling/data/CH_246800.html.
7. L. T. Popoola, A. S. Grema, G. K. Latinwo, B. Gutti, and A. S. Balogun, Corrosion problems during oil and gas production and its mitigation, *Int. J. Ind. Chem.*, **4**(1) (2013).
8. D. S. Park, J. Y. Lim, Y. G. Cho, S. J. Song, and J. H. Kim, A study on the comparison on adsorption characteristics of zeolite and DETOX for the removal of H_2S, *Journal of Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, **15**(7), 4675-4681 (2014).
9. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, Utilization of Discarded Tree Debris for Commercial Production of Activated Carbon (2000) Available from: http://www.ndsl.kr/ndsl/search/detail/report/reportSearchResultDetail.do?cn=TRKO200200034599.
10. W. T. Kwon, N. K. Park, J. H. Kim, T. J. Lee, and C. K. Yi, Preparation of high attrition resistance sorbents on high temperature desulfurization, *Theories and Applications of Chemical Engineering*, **2**(1), 709-712 (1996).
11. S. Y. Choi, D. H. Han, and S. S. Kim, A study on the optimization of active material and preparation of granular adsorbent of metal oxide-based adsorbent for adsorption of hydrogen sulfide (H_2S), *Appl. Chem. Eng.*, **30**(4), 460-465 (2019).
12. S. Y. Choi, Y. H. Jang, and S. S. Kim, A study on the optimization of sewage sludge-based adsorbent Ccarbonization condition for improving adsorption capacity of hydrogen sulfide (H_2S), *Appl. Chem. Eng.*, **29**(6), 765-771 (2018).
13. N. Laosiripojana, R. Sitthikhankaew, S. Predapitakkun, R. W. Kiattikomol, S. Pumhiran, and S. Assabumrungrat, Comparative study of hydrogen sulfide adsorption by using alkaline impregnated activated carbons for hot fuel gas purification, *Energy Procedia*, **9**, 15-24 (2011).
14. R. Yan, D. T. Liang, L. Tsen, and H. J. Tay, Kinetics and mechanisms of H_2S adsorption by alkaline activated carbon, *Environ. Sci. Tech.*, **36**, 4460-4466 (2002).
15. D. Y. Choi, J. W. Lee, S. C. Jang, B. S. Ahn, and D. K. Choi, Adsorption dynamics of hydrogen sulfide in impregnated activated carbon bed, *Adsorption*, **14**(4-5), 533-538 (2008).
16. L. Barelli, G. Bidini, N. D. Arespacochaga, L. Perez, and E. Sisani, Biogas use in high temperature fuel cells: Enhancement of KOH-KI activated carbon performance toward H_2S removal, *Int. J. Hydrog. Energy*, **42**, 10341-10353 (2017).
17. N. Rakmak, W. Wiyaratn, C. Bunyakan, and J. Chungsiriporn, Synthesis of Fe/MgO nano-crystal catalysts by sol-gel method for hydrogen sulfide removal, *Chem. Eng. J.*, **162**, 84-90 (2010).
18. R. Darby and R. P. Chhabra, *Chemical Engineering Fluid Mechanics*, 3rd edition, CRC Press (2016).
19. T. Hayashi, T. G. Lee, M. Hazelwood, E. Hedrick, and P. Biswas, Characterization of activated carbon fiber filters for pressure drop, submicrometer particulate collection, and mercury capture, *J. Air Waste Manag. Assoc.*, **50**, 922-929 (2000).
20. S. W. Lee, S. K. Bae, J. H. Kwon, Y. S. Na, C. D. An, Y. S. Yoon, and S. K. Song, Correlations between pore structure of activated carbon and adsorption characteristics of acetone vapor, *J. Korea Soc. Environ. Eng.*, **27**(6), 620-625 (2005).
21. F. Adib, A. Bagreev, and T. J. Bandosz, Effect of surface characteristics of wood-based activated carbons on adsorption of hydrogen sulfide, *J. Colloid Interface Sci.*, **214**, 407-415 (1999).
22. D. Y. Choi, J. W. Lee, S. C. Jang, B. S. Ahn, and D. K. Choi, Adsorption dynamics of hydrogen sulfide in impregnated activated carbon bed, *Adsorption*, **14**(4-5), 533-538 (2008).
23. N. Rakmak, W. Wiyaratn, C. Bunyakan, and J. Chungsiriporn, Synthesis of Fe/MgO nano-crystal catalysts by sol-gel method for hydrogen sulfide removal, *Chem. Eng. J.*, **162**, 84-90 (2010).
24. C. S. G. Phillips, II (B). Organic and biochemical, The chromatography of gases and vapours, *Discuss. Faraday Soc.*, **7**, 241-248 (1949).
25. R. M., Bruce, F. Y., Donald, and H. O., *Theodore, Fundamentals of Fluid Mechanics*, 4rd edition, John Wiley & Sons, Inc., 475-481 (2002).

Authors

Younghee Jang, M.Sc., Student, Gwnaggosan-ro, Yeongtong-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do, Korea; yjang39@kyonggi.ac.kr

Bong-Hwan Kim, Ph.D., Professor, Gyeongnam National University of Science and Technolgy, Chiram-dong, Jinju-si, Gyeongsangnam-do, 150, Korea; bhwkim@gntech.ac.kr

Sung Su Kim, Ph.D., Professor, Gwnaggosan-ro, Yeongtong-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do, Korea; sskim@kyonggi.ac.kr