

황화수소(H₂S) 흡착성능 증진을 위한 하수슬러지 기반 흡착제 탄화조건 최적화 연구

최성열 · 장영희 · 김성수^{*,†}

경기대학교 일반대학원 환경에너지공학과, *경기대학교 환경에너지공학과
(2018년 9월 21일 접수, 2018년 10월 8일 심사, 2018년 10월 10일 채택)

A study on the Optimization of Sewage Sludge-based Adsorbent Carbonization Condition for Improving Adsorption Capacity of Hydrogen Sulfide (H₂S)

Sung Yeol Choi, Young Hee Jang, and Sung Su Kim^{*,†}

Department of Environmental Energy Engineering, Graduate School of Kyonggi University, 154-42 gwanggyosanro, Youngtong-ku, Suwon-si, Gyeonggi-do 16227, Korea

*Department of Environmental Energy Engineering, Kyonggi University, 154-42 gwanggyosanro, Youngtong-ku, Suwon-si, Gyeonggi-do 16227, Korea

(Received September 21, 2018; Revised October 8, 2018; Accepted October 10, 2018)

초 록

본 연구에서는 각종 환경기초시설에서 발생하는 악취 유발물질 중 H₂S를 처리하기 위한 하수슬러지 기반 흡착제의 흡착성능 증진을 위해 제조조건 중 탄화조건 최적화에 대한 연구를 수행하였다. 적용되는 흡착제는 하수처리장에서 발생하는 슬러지를 온도 및 승온속도와 같은 탄화조건을 달리하여 제조하였으며, 흡착제의 물리적 특성과 흡착성능과의 상관관계를 확인하였다. 실험결과 10 °C/min의 승온속도로 900 °C의 온도에서 탄화과정을 거친 슬러지의 흡착성능이 가장 우수하였으며, SEM, BET 분석을 통해 비표면적 및 기공특성(기공크기, 부피)이 흡착성능의 주요 인자임을 확인하였다. 최적 탄화조건 흡착제의 흡착성능을 증진시키기 위해 K 이온을 담지하였으나, 하수슬러지 기반 흡착제의 경우 큰 영향이 없는 것으로 확인하였다.

Abstract

In this study, the optimization of carbonization conditions in manufacturing processes was performed to improve the absorption performance of sewage sludge based sorbent used for treating H₂S out of all odorous substances generated by various environmental facilities. Adsorbents applied were manufactured from the sewage treatment plant under different carbonization conditions, such as temperature and heating rate, and the correlation between the adsorption performance and physical properties of the adsorbents was verified. As a result, the adsorption performance of sludge at 900 °C with a heating rate of 10 °C/min was the best, and the SEM and BET analysis revealed that specific surface area and characteristics of pore (size, volume) were major parameters for the adsorption. In addition, the effect of K ions used for improving the adsorption performance of the optimum carbonization condition sorbent was insignificant for the sewage sludge based sorbent.

Keywords: H₂S (hydrogen sulfide), carbonization, sewage sludge, adsorbent, odor

1. 서 론

전 세계적으로 산업이 발달함에 따라 다양한 환경오염물질이 발생되었으며, 각종 산업시설에서 배출되는 대기오염물질들은 분진, 미스트, 유해가스 및 악취 등으로 그 종류가 다양해지고 있다. 이로 인해 작업장 및 주변 주거시설에서의 공기 오염을 가속시켜 점차적으로 인

체에 유해한 대기오염물질에 대한 관심이 높아지고 있는 실정이다. 특히 악취는 환경기초시설과 산업장에서 근무하는 근로자와 인근 주민에게 직접적인 피해를 가하는 원인이 되고 있다[1]. 악취는 기본적인 특성상 다양한 물질에 의해서 발생하는 감각공해로써 개인마다 느끼는 정도의 차이가 있는 것이 특징이지만 극미량에서도 악취를 유발하는 특성이 있다. 국가에서 규제하는 22가지의 악취유발물질 중 각종 환경기초시설에서 발생하는 악취물질인 황화수소(H₂S)는 계란 썩는 냄새가 나는 무색의 유독한 기체로서 인체의 위장이나 폐에 흡수되어 질식, 폐 질환, 신경중추마비 등을 발생시킬 수 있다[2]. 이러한 H₂S 가스는 하·폐수처리장, 매립지시설, 폐기물 처리시설과 같은 환경기초시설 등에서 발생하며, 발생원별 H₂S의 농도는 다르지만(Table

† Corresponding Author: Kyonggi University,
Department of Environmental Energy Engineering, 154-42 gwanggyosanro,
Youngtong-ku, Suwon-si, Gyeonggi-do 16227, Korea
Tel: +82-31-249-9741 e-mail: sskim@kyonggi.ac.kr

Table 1. Concentration of Hydrogen Sulfide and Gas Composition by Source

Source	H ₂ S concentration
Biogas	0~500 ppm
Livestock Facility	116.20 ppm
Animal waste water treatment facility	1.24 ppm
Waste treatment plant	12.20 ppm
Plastic recycling center	14.4 ppm

Table 2. Proximate Analysis of Sewage Sludge Sample

Component	Values
Moisture	85%
Ash	4.7%
Combustibles	10.3%

**Figure 1. Photograph of sewage sludge sample derived from 'E' sewage treatment plant.**

1) 주변시설의 주요 민원 대상으로 지목되고 있다[3-5].

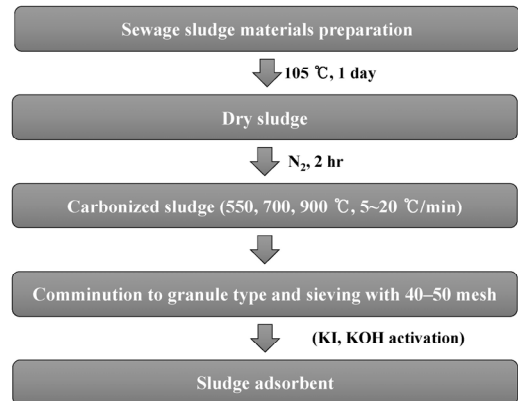
일반적으로 각종 환경 기조시설에서 발생하는 H₂S를 처리하기 위해 습식세정법 또는 건식흡착법을 적용하고 있다. 습식세정법은 악취를 함유한 가스를 액체와 접촉시켜 악취물질을 액상에 흡수시키거나 화학적 반응을 일으켜 제거하는 방법이지만, 2차 오염물(폐수)의 발생이 불가피한 단점이 있다[6]. 따라서 비교적 단순한 처리공정인 건식흡착법을 이용하여 악취물질을 제거하는 것이 보편적이나, 주로 사용되는 흡착제인 활성탄의 수수 급증 및 원자재 부족으로 인한 원가 상승으로 기존 활성탄을 대체 가능한 흡착제의 개발이 요구되는 실정이다[7].

따라서 상기 문제를 해결하기 위해 제올라이트 또는 다양한 산업부산물을 이용한 연구가 주로 진행되어왔다. 그중 정수, 하폐수처리장에서 발생하는 슬러지를 흡착제로 이용하는 연구는 해당 물질의 장점뿐만 아니라 정적변화로 인한 새로운 처리방법 개발 필요성에 의해 다수 진행되었다[8-11]. 이러한 슬러지는 발생하는 처리시설 및 처리환경에 따라 구성성분이 다르지만, 건조 시 주 성분이 대부분 유기물로 이루어져 있기 때문에 탄화공정을 통해 탄소체로 개질하여 흡착제로 활용가능한 장점이 있다. 또한 물 사용량 증가로 인한 처리장의 증설뿐만 아니라, 2012년부터 해양투기가 금지됨에 따라 자원화를 위한 슬러지의 처리량이 급증하여 공급이 원활한 장점이 있다.

슬러지 기반 흡착제는 흡착성능 증진을 위해 탄화 조건 제어(온도, 가스 분위기 등)와 같은 물리적 활성화법[9,12]과 각종 화학약품(산, 금속산화물, 금속탄화물 등) 첨가를 통해 세공 특성을 제어하는 화학적 활성화법[9-11]에 관한 연구가 진행되고 있다. 슬러지의 종류 및

Table 3. Manufacturing Conditions of Sewage Sludge Adsorbent Samples

Adsorbents	Treatment conditions
550CS	550 °C carbonization (10 °C/min)
K/550CS	550 °C carbonization (10 °C/min) + KI
700CS	700 °C carbonization (10 °C/min)
K/700CS	550 °C carbonization (10 °C/min) + KI
K(A)/900CS	900 °C carbonization (10 °C/min) + KI
K(B)/900CS	900 °C carbonization (10 °C/min) + KOH
K(C)/900CS	900 °C carbonization (10 °C/min) + KOH + HCl
900CS (5)	900 °C carbonization (10 °C/min)
900CS (10)	900 °C carbonization (10 °C/min)
900CS (20)	900 °C carbonization (10 °C/min)

**Figure 2. Manufacturing procedure of sewage sludge adsorbent.**

활성화 방법에 따라 흡착제의 성능증진 정도는 다르지만, 제조과정 중 주로 탄화조건이 성능 증진 정도가 가장 큰 단계로 알려져 있다 [13]. 그러나 담금 및 세척으로 진행되는 비교적 간단한 화학약품 처리에 관한 연구가 주로 진행되어 현재 활성 처리된 슬러지 기반 흡착제의 성능이 기존 활성탄 대비 70-80%로 한정되어 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 슬러지 재활용 흡착제의 흡착성능을 극대화하기 위해 다양한 탄화 온도 및 탄화속온속도와 같은 탄화조건을 달리하여 탄화슬러지흡착제를 제조하였다. 제조된 소재의 물성분석을 통해 H₂S 흡착성능과의 상관관계를 고찰하였다. 또한 최적 탄화조건 제조 슬러지 기반 흡착제에 H₂S 흡착성능 증진 알칼리 금속이온 물질로 잘 알려진 K(칼륨)을 담지하여 흡착성능 증진여부를 확인하고자 하였다.

2. 실험

2.1. 대상 시료 및 흡착제 제조 방법

본 연구에서는 탄화 슬러지 흡착제를 제조하기 위하여 E 하수처리장에서 발생하는 하수 슬러지 탈수케익을 대상으로 사용하였으며, 슬러지의 형태 및 3성분 분석을 통한 시료특성 분석결과를 Figure 1, Table 2에 나타내었다. Table 2로부터 하수슬러지의 함수율은 약 85%이었으며, 회분 및 가연분은 각각 4.7, 10.3%로 나타났다. 흡착제의 제조방법은 기본적으로 하수슬러지를 105 °C dry oven에서 건조시킨

Table 4. Experimental Condition in a Fixed Bed Reactor

Particle size (μm)	359	
Temperature (°C)	25	
Relative humidity (%)	50~60	
Inlet gas conc.	O ₂ (%)	21
(N ₂ Balance)	H ₂ S (ppm)	20
Adsorbents loadings (g)	0.03	
Total flow (cc/min)	500	

후, 불활성 분위기를 유지하기 위해 질소를 주입하여 관형로에서 10 °C/min의 승온속도로 550, 700 °C에서 탄화하였으며, 900 °C로 열처리 시에는 승온속도를 5, 10, 20 °C/min 조건으로 제조하여 성능구배를 확인하였다. 탄화 목표 온도에서 2 h 유지 후 상온으로 냉각시켰으며, 분쇄 후 40-50 mesh 사이 크기의 흡착제를 sieving 하여 제조하였다. 또한 흡착제의 황화수소 흡착성능 증진 물질로 알려진 알칼리 금속이온(K)이 담지된 흡착제를 제조하여 성능을 극대화하고자 하였다. 활성물질이 담지된 탄화슬러지의 제조방법은 탄화된 슬러지 흡착제를 계산된 농도의 KI, KOH 용액과 교반하고, rotary vacuum evaporator를 이용하여 65 °C에서 수분을 증발시킨 다음, 질소 분위기 하에 관형로에서 400 °C, 2 h 열처리 하여 최종적으로 흡착제를 얻었다. 개략적인 흡착제의 제조방법을 Figure 2에 나타내었으며, 제조조건에 따른 종류별 흡착제를 Table 3에 명명하여 나타내었다.

2.2. 흡착제 특성 분석

2.2.1. 비표면적 측정(BET)

제조된 흡착제의 비표면적과 세공크기 분포 및 부피를 확인하기 위해 BEL Japan Inc.의 BELSORP-max를 이용하여 BET 분석을 수행하였다. 흡착제 표면에 N₂를 흡착시켜 흡착된 질소가스의 양을 측정하여 BET (Brunauer Emmett Teller)식으로 계산하여 비표면적을 계산하였고, 기공 크기 분포는 BJH (Barrett-Joyner-Halenda)법에 의해 계산하였다.

2.2.2. 전자현미경 분석(SEM)

제조된 흡착제의 표면상태 및 기공구조를 확인하고 평가하기 위해 Hitachi Co.의 S-4800를 이용하여 FE-SEM (field emission scanning electron microscope) 분석을 수행하였다.

2.3. 실험장치 및 방법

제조한 흡착제의 흡착성능 평가를 위한 실험 장치는 크게 가스주입 부분, 흡착반응부분 그리고 흡착 후 가스농도 분석부분으로 구성되어 있으며 장치구성을 Figure 3에 나타내었다. 제조된 흡착제는 흡착제층을 고정하기 위해 quartz wool 위에 충전하였다. 반응기에 공급되는 가스는 N₂, O₂, H₂S/N₂의 각 실린더로부터 mass flow controller (MFC, MKS Co.)를 통하여 주입하였으며, 또한, 수분의 공급은 N₂가 bubbler를 통해 수분이 함유된 가스가 반응기에 주입되는 형태를 이용하였다. 이때 공급되는 양을 일정하게 하기 위하여 이중 jacket 형태의 bubbler 외부에 circulator를 이용하여 일정온도의 물을 순환시켰다. 반응기의 온도는 고정층 상부에 장착된 K-type의 열전대와 PID 온도제어기 (PID controller, Nova Co.)을 이용하여 25 °C로 조절하였으며, 반응 후 가스는 분석기로 유입되기 전 chiller를 통해 수분을 완전히 제거하였다. 반응기 후단의 H₂S의 농도는 Honeywell Co.의 Multirae mul-

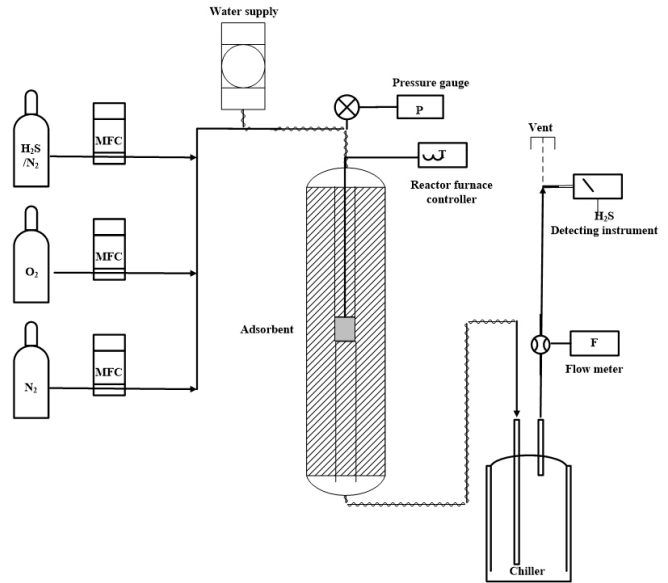


Figure 3. Schematic diagram of H₂S adsorption test reactor.

ti-gas monitor 기기를 이용하여 연속적으로 H₂S 농도값을 측정 및 저장하였으며, 흡착반응 실험 조건을 Table 4에 나타내었다. 본 연구에서 사용된 흡착제의 성능은 단위 흡착제 무게 당 흡착질의 무게(g H₂S/g 흡착제)로 나타내어 각 흡착제 간 성능을 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 슬러지 탄화온도에 따른 흡착 성능 영향 평가

본 연구에서는 하수처리장에서 발생한 슬러지를 이용하여 흡착제 제조 시 최대 흡착성능을 나타내는 탄화온도를 확인하기 위하여 550, 700 및 900 °C의 탄화온도로 제조된 슬러지 흡착제의 흡착성능을 비교하였으며, 결과를 Figure 4에 나타내었다. 비교실험 결과, 탄화온도가 증가함에 따라 슬러지 흡착제의 흡착성능이 증가하였으나, 550, 700 °C에서 탄화한 슬러지의 흡착성능이 각각 0.000275, 0.00136 g/g 인 반면 900 °C에서 탄화공정을 수행한 슬러지 흡착제는 0.0237 g/g 으로 급격하게 증진되는 것을 확인하였다. 또한 각 온도별로 제조된 슬러지흡착제의 흡착성능을 증진시키기 위해 활성물질인 K (KI)를 담지하고 흡착성능을 평가하였으나, 오히려 흡착성능이 감소함을 확인하였다(Figure 5).

이에 따라 탄화온도에 따른 성능차이와 활성물질 담지에 의한 성능 저하 원인을 확인하기 위해 제조된 흡착제를 BET 분석을 통해 비표면적, 평균 세공크기, 세공부피를 비교하여 Table 5에 나타내고 기공 분포도를 Figure 6에 나타내었다. 기존 흡착제 탄화온도 관련 연구결과에 의하면 최적 탄화온도는 탄화(활성화)가스 조건에 따라 다르지만, Jung 등의 연구(2008)에 의하면 CO₂를 이용하여 탄화하는 경우 하수슬러지의 최적 탄화온도는 700 °C이였으며, 그 이상의 탄화온도에서는 탄소구조가 CO 가스로 교차결합하면서 세공의 소멸현상에 의한 기공막힘 현상으로 세공축소가 일어난다고 보고하였다[9,14]. 그러나 본 연구에서는 Table 5, Figure 6을 통해 알 수 있듯이 탄화온도 중 최적 탄화온도조건인 900 °C에서 가장 큰 비표면적(19 m²/g), 세공부피(0.0672 cm³/g) 및 작은 평균세공크기(14.54 nm)에 의해 흡착성능이 증진이 되었다고 판단하였다. 이러한 상기 연구결과와의 차이점은

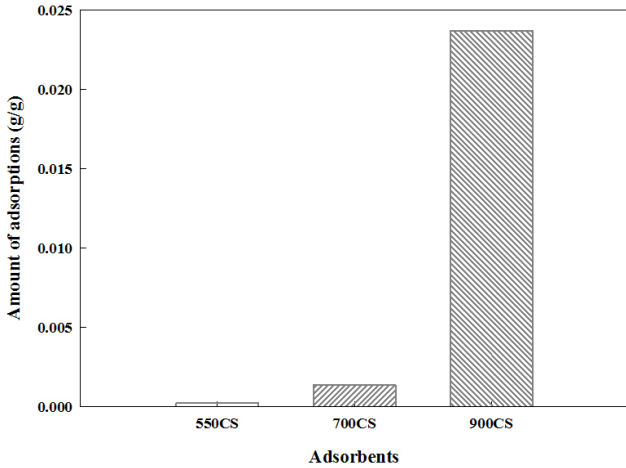


Figure 4. Effect of the carbonization temperature on H₂S adsorption amount of H₂S (g/g) for carbonized sludge adsorbents (Experimental condition: H₂S = 20 ppm, O₂ = 21%, R.H = 50-60%, adsorbent loadings = 0.03 g).

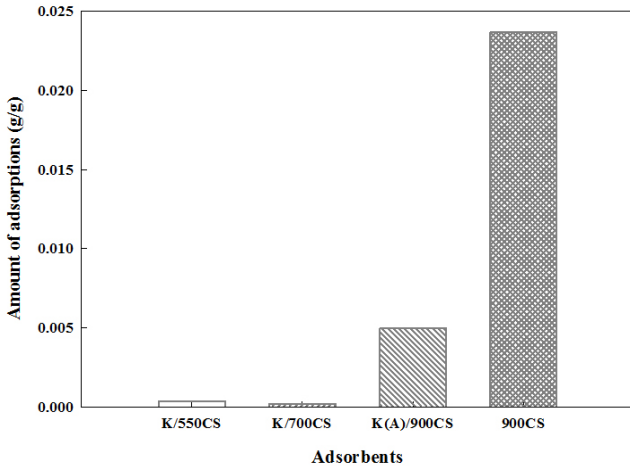


Figure 5. Effect of the active material coating on H₂S adsorption amount of H₂S (g/g) for carbonized sludge adsorbents (Experimental condition: H₂S = 20 ppm, O₂ = 21%, R.H = 50-60%, adsorbent loadings = 0.03 g).

하수슬러지특성상 발생원에 따른 다양한 성상 및 형태를 갖기 때문에 판단하였다. SEM 분석을 통해 탄화슬러지 흡착제의 표면을 확인 하였으며, 이의 결과를 Figure 7에 나타내었다. Figure 7에서 볼 수 있듯이 탄화온도가 증가함에 따라 세공의 수가 증가함을 확인하였으며, BET 분석결과와 일치하는 결과를 확인하였다. Figure 5에 나타난 활성금속 물질첨가에 의한 성능저하는 Figure 7의 SEM 분석 상에서 확인하였다. 성능저하의 원인으로는 활성물질이 흡착제 표면상의 기공 막힘에 의해 나타난 결과로 판단하였으며, 표면상의 국부적인 막힘현상으로 인해 Table 5에 나타난 900 °C에서 탄화한 슬러지 흡착제의 비표면적과 차이는 없는 것으로 판단하였다. 본 실험결과를 통해 슬러지를 재활용하여 제조하는 탄화슬러지 흡착제의 최적 탄화 온도 조건은 900 °C이며, 이와 같은 탄화 공정을 통해 기공특성 및 비표면적 특성이 극대화됨에 따라 흡착성능 또한 증진될 수 있음을 확인하였다.

Table 5. BET Analysis Results of Different Temperature Carbonized Sludge Adsorbents

Adsorbents	BET (m ² /g)	Mean pore size (nm)	Pore volume (cm ³ /g)
550CS	2	25.499	0.0123
700CS	1	36.249	0.0086
900CS	19	14.538	0.0672
K(A)/900CS	23	13.721	0.0770

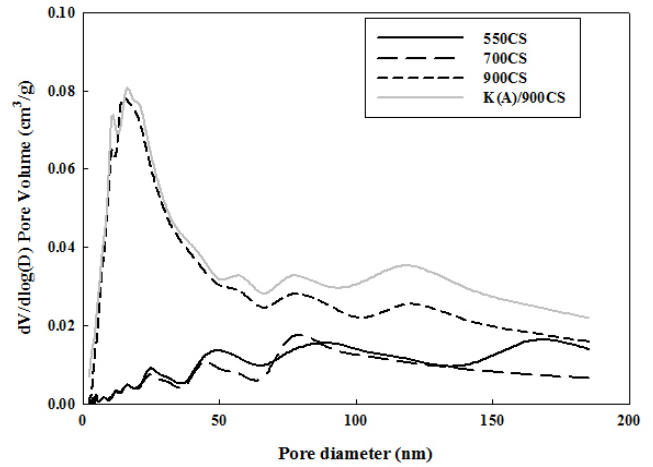


Figure 6. Pore size distributions of different temperature carbonized sludge adsorbents.

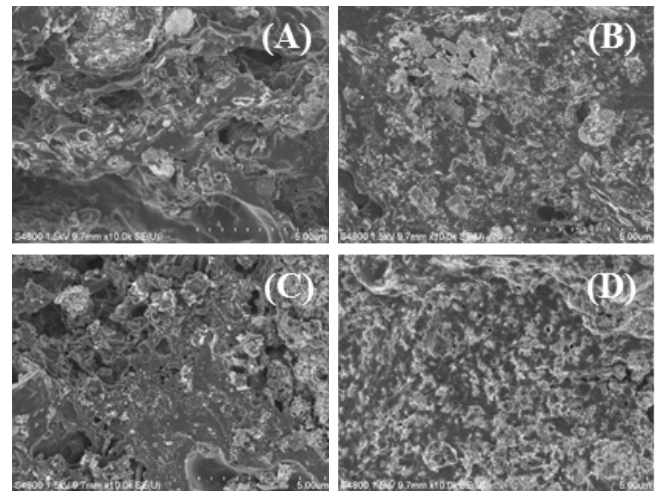


Figure 7. SEM images of different temperature carbonized sludge adsorbents. A: 550CS, B: 700CS, C: 900CS, D: K/900CS.

3.2. 슬러지 탄화 승온속도에 따른 흡착 성능 영향 평가

일반적으로 흡착제의 흡착성능은 주로 흡착제의 세공크기 및 구조 등에 의해 결정되어진다고 알려져 있다[15-17]. 흡착제의 구조변화는 탄화온도 뿐만 아니라 승온속도에 의해서도 영향을 받는다. 같은 탄소기반 흡착제인 탄소수지 재활용 흡착제의 경우 승온속도에 대한 탄화실험에서 승온속도는 비표면적 및 세공부피 모두 비례한다고 보고 하였으며[16], 다공성 탄소재의 경우 승온온도에 의해 세공의 크기 분포가 변화하며, 특히 빠른 승온속도는 발생된 기공의 합체가 이뤄지

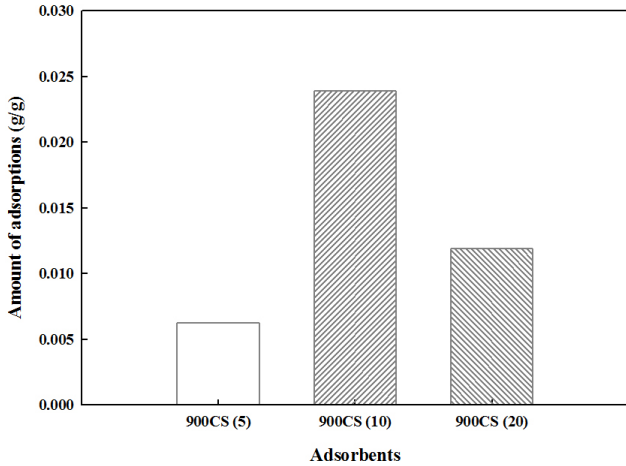


Figure 8. Effect of the carbonization heating rate on H₂S adsorption amount of H₂S (g/g) for carbonized sludge adsorbents (Experimental condition: H₂S = 20 ppm, O₂ = 21%, R.H = 50-60%, adsorbent loadings = 0.03 g).

지 못해 전반적으로 기공의 크기가 작았고, 느릴수록 기공의 크기가 커져 흡착성능에 영향이 있다고 보고하였다[17]. 따라서 본 연구에서는 슬러지를 이용한 흡착제 제조 시 탄화 승온속도와 구조변화 및 H₂S 흡착성능 간의 관계를 확인하고자 하였다. 흡착제는 최적 탄화온도인 900 °C로 고정하여, 5, 10, 20 °C/min 승온속도별로 2 h 유지하여 제조하였으며, H₂S 흡착성능을 Figure 8에 나타내었다. 비교실험 결과, 5, 10, 20 °C/min 승온속도별로 각각의 흡착성능이 0.0062, 0.0239, 0.0119 g/g으로 승온속도와 흡착성능은 비례하지 않았으며, 승온속도가 10 °C/min일 때 흡착성능이 가장 우수하였다.

상기 결과를 바탕으로 슬러지 탄화 시 승온속도에 의한 구조변화 및 성능과의 상관관계를 확인하기 위하여 위와 같이 BET 분석을 진행하고 비표면적, 평균 세공크기 및 세공부피를 Table 6에 기공 분포도를 Figure 9에 비교하여 나타내었다. BET 분석결과 Table 6에서 확인할 수 있듯이 세공부피는 승온속도와 비례하여 증가하는 경향을 나타내지만, 승온속도가 10 °C/min일 때 비표면적이 가장 크고, 평균 세공크기가 가장 작았다. 이는 Figure 9에서 세공크기 분포를 통해 확인할 수 있는데, 5, 20 °C/min에서는 주로 큰 크기의 세공이 주를 이루고, 10 °C/min에서 가장 작은 크기의 세공크기분포가 존재함을 확인하였다. Figure 10에 나타낸 흡착제 표면의 SEM 분석결과 또한 다른 소재에 비해 상대적으로 10 °C/min의 승온속도로 열처리한 소재의 표면기공 축소를 확인하였다. 따라서 하수슬러지의 탄화 공정 중 승온속도에 의해서도 기공특성이 변화함을 확인하였으며, 승온온도와 흡착제의 성능은 비례관계가 아닌 특정 승온속도에서 생성된 큰 비표면적 및 작은 세공크기에 의해 증진됨을 확인하였다.

3.3. 최적 슬러지 탄화조건 흡착제의 KOH 활성화에 따른 흡착 성능 영향 평가

상기의 연구결과를 통해 황화수소 흡착활성물질인 KI를 담지 한 경우에는 활성물질의 표면 불균일 분산으로 인해 성능증진을 기대하기 어려웠다. 그러나 활성화 물질이 아닌 K 침착 및 제거를 통해 추가적인 기공을 형성하는 KOH 활성화를 적용하였을 때 성능증진이 가능한지 확인하고자 하였다. 따라서 상기의 최적 탄화조건 흡착제에 KOH 활성화를 적용한 흡착제를 제조하고 흡착성능을 확인하여 처리

Table 6. BET Analysis Results of Different Carbonization Heating Rate Sludge Adsorbents

Adsorbents	BET (m ² /g)	Mean pore size (nm)	Pore volume (cm ³ /g)
900CS (5)	15	15.401	0.0582
900CS (10)	19	14.538	0.0672
900CS (20)	17	17.675	0.0730

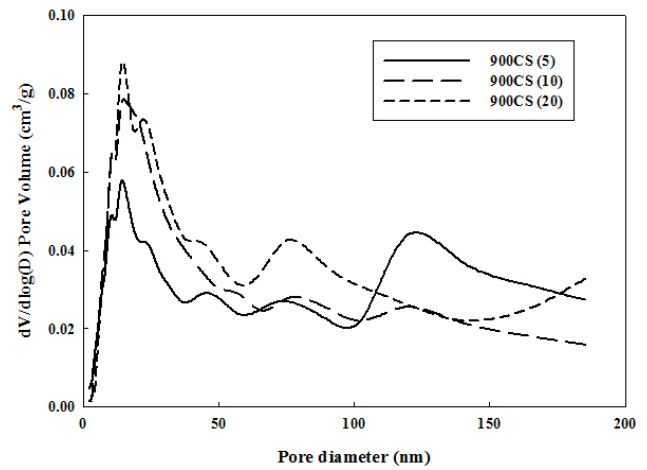


Figure 9. Pore size distribution of different carbonization heating rate sludge adsorbents.

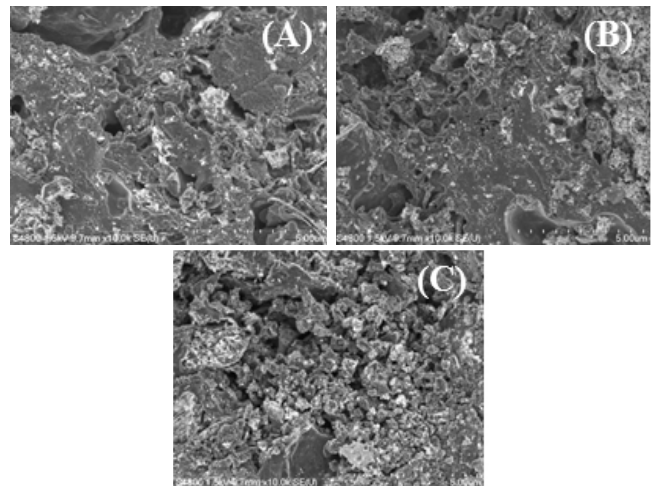


Figure 10. SEM images of different carbonization heating rate sludge adsorbents. A: 900CS (5), B: 900CS (10), C: 900CS (20).

전 흡착제와의 성능을 비교하였다. 또한 제조된 흡착제의 흡착성능 객관성 확보를 위해 시약급 활성탄 흡착제와의 성능을 비교하여 Figure 11에 나타내었다. 비교결과 같은 알칼리 금속이온 함유 물질인 KI와 같이 단순 KOH 담지에 의한 성능증진은 기대할 수 없었다. 또한 담지 후 세공 확장을 위한 산세척에 의해 성능증진이 되었으나, 활성화처리 전 흡착제와 비교하였을 때 흡착성능이 유사하였다. 이는 Lee 등[18]의 KOH 활성화를 통해 산세척에 의한 세공 내 C와 결합된 KC형태의 결합물 제거가 이뤄진 연구결과와 상이한 결과로써, 본 연구에서는 위의 제거과정을 통한 기공제어가 이뤄지지 않고 단순 KOH

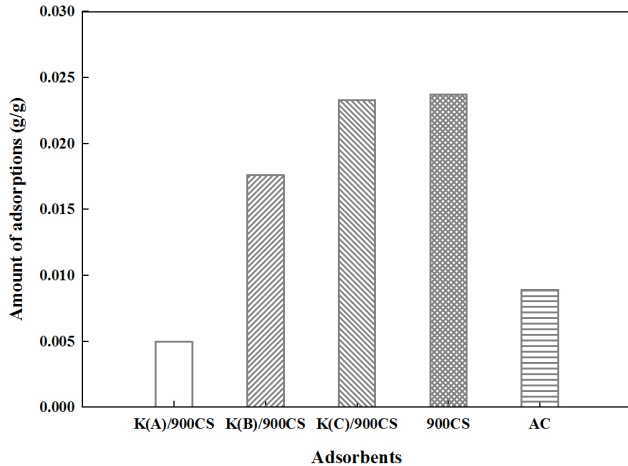


Figure 11. Effect of the KOH activation on H₂S adsorption amount of H₂S (g/g) for carbonized sludge adsorbents (Experimental condition: H₂S = 20 ppm, O₂ = 21%, R.H = 50-60%, adsorbent loadings = 0.03 g).

만 제거된 것으로 판단되어, 성능증진을 위해서는 다른 적절한 활성화방법이 적용되어야 할 것으로 판단된다. 그럼에도 불구하고, 활성탄 흡착제와 흡착성능을 비교한 결과 본 연구에서 제조한 최적 흡착제의 흡착성능이 0.0237 g/g으로 활성탄 흡착성능인 0.00889 g/g보다 2배 이상 우수한 점으로 보아, 활성탄 대체 황화수소 흡착제로 활용 가능할 것으로 판단된다.

4. 결 론

하수슬러지 기반 탄화 공정조건 및 최적 탄화슬러지 흡착제의 금속 이온 활성화에 따른 H₂S 흡착 성능 및 구조 변화를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 하수슬러지 흡착제 제조를 위한 탄화공정 조건 중 탄화온도와 흡착성능은 비례하였으며, 특히 900 °C에서 탄화한 슬러지의 흡착성능이 가장 우수하였다. 이는 해당 온도에서 큰 비표면적 및 세공부피, 작은 평균세공크기에 의해 성능이 증진된다고 판단하였다. 성능 증진을 위해 KI를 담지하였지만, SEM 분석결과 활성금속물질의 기공막힘 현상으로 인해 오히려 성능이 저하된 것으로 판단하였다.

2. 탄화공정 조건 중 탄화 승온속도에 의한 구조변화 및 성능과의 상관관계를 확인한 결과, 5, 10, 20 °C/min 중 중간 승온속도인 10 °C/min에서 가장 작은 세공크기 및 비표면적에 의해 흡착성능이 가장 우수함을 확인하였다. 이를 통해 슬러지 탄화 시 승온속도에 의해 기공특성이 변화함을 확인하였으며, 승온온도와 흡착성능은 비례관계가 아닌 특정 승온속도에서의 작은 세공발달 및 큰 비표면적에 의해 증진됨을 확인하였다.

3. 최적 탄화슬러지 흡착제의 성능증진을 위해 대표적인 화학적 활성화법인 KOH 활성화법을 적용하였으나, 흡착성능이 증진되지 않았다. 따라서 흡착제의 성능증진을 위해서는 활성화 조건변화 또는 다른 적절한 활성화법이 적용되어야 할 것으로 판단된다.

4. 본 연구를 통해 제조된 최적 탄화조건 흡착제의 황화수소 흡착성능은 활성탄 대비 2배 이상 우수함을 확인하였으며 기존 활성탄 대체 흡착제로 활용 가능할 것으로 판단된다.

감 사

“글로벌탑 환경기술개발사업”으로 지원받은 과제임(과제번호: RE2016 002200002).

References

1. J. S. Park, A study on the development of gas scrubber for removal of odor gas containing hydrogen sulfide and the ammonia, MS Dissertation, Inje University, Gimhae, Korea (2002).
2. K. Y. Kim and J. H. Choi, Distribution characteristics of odorous compounds concentrations according to type of pig buildings, *J. Korean Soc. Odor Res. Eng.*, **12**(1), 27-37 (2013).
3. H. W. Ryu, K. S. Jo, T. H. Lee, and M. Huh, Management of offensive odors in swine production facilities: I. Domestic status and offensive odors in swine production, *J. Korean Soc. Odor Res. Eng.*, **2**(2), 69-77 (2003).
4. G. Y. Kim, J. B. Park, C. N. Kim, and K. J. Lee, Field study of emission characteristics of ammonia and hydrogen sulfide by pig building type, *J. Korean Soc. Occup. Environ. Hyg.*, **16**(1), 36-43 (2016).
5. B. C. Ko, J. K. Lee, Y. S. Lee, M. G. Lee, and S. K. Kam, A study on odor emission characteristics of domestic sewage treatment facilities using composite odor concentration and hydrogen sulfide concentration, *J. Environ. Sci.*, **21**(11), 1379-1388 (2012).
6. J. K. Kim, S. S. Kim, S. C. Hong, E. D. Lee, and Y. Kang, Decomposition of EtOH and oxidation of H₂S by using UV/photocatalysis system, *Korean Chem. Eng. Res.*, **51**(3), 297-302 (2013).
7. C. K. Jung, Utilization of discarded tree debris for commercial production of activated carbon, final research report, *Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs*, Korea (2000).
8. C. D. Park, J. Y. Youn, and Y. S. Park, Adsorption characteristics of H₂S on adsorbent made by sewage sludge in fixed bed adsorption column, *Korean Chem. Eng. Res.*, **50**(4), 718-722 (2012).
9. D. H. Jung, W. S. Baek, S. H. Kim, and Y. N. Chun, Adsorption characteristics of sewage sludge prepared by physical and chemical activation, *J. Adv. Eng. Technol.*, **1**(1), 91-97 (2008).
10. J. B. Cho, H. Jang, M. J. Sohn, M. G. Kim, S. J. Kim, and S. C. Han, Study on removal feasibility of nitrogenous malodor compounds using AlPO₄ zeolite manufactured from total phosphorus sludge, *J. Korea Soc. Waste Manag.*, **30**(7), 734-740 (2013).
11. J. H. Bae, N. Y. Park, C. H. Lee, Y. K. Park, and J. K. Jeon, Adsorption performance of basic gas over pellet-type adsorbents prepared from water treatment sludge, *Korean Chem. Eng. Res.*, **51**(3), 352-357 (2013).
12. D. H. Jung, M. S. Lim, J. S. Song, and Y. N. Chun, Development of a carbonization activator, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **20**(1), 109-115 (2009).
13. S. Y. Lee, A study on the surface characteristics and adsorption properties in carbonaceous materials. MS dissertation, Seoul National University of Technology, Seoul, Korea (2003).
14. Y. C. Park, G. J. Jo, and J. H. Choe, Production and CO₂ adsorption characteristics of activated carbon from bamboo by CO₂ activation method, *Korean Chem. Eng. Res.*, **43**(1), 146-152 (2005).
15. G. C. Lee, T. K. Yoon, and Z. H. Shon, Effect of operating parameters on the physical properties of activated carbon manufac-

- tured with bead-type polymer resin, *Clean Technol.*, **19**(3), 279-286 (2013).
16. B. Krystyna, B. Wieslaw, and K. Marek, Carbon adsorbents from waste ion-exchange resin, *Carbon*, **40**(12), 2213-2220 (2002).
17. K. Y. Cho, K. J. Kim, and D. H. Riu, Effect of heating rate and pressure on pore growth of porous carbon Materials, *Carbon Sci.*, **7**(4), 271-276 (2006).
18. S. K. Lee, C. S. Yim, and Y. S. Park, H₂S adsorption characteristics and property analyses of activated carbon adsorbent impregnated with basic solutions, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **32**(11), 1011-1016 (2010).