

정수슬러지 유래 흡착제와 침착활성탄의 암모니아 및 포름알데히드 기체 흡착 성능 비교

이철호 · 박나영 · 김고운 · 전종기[†]

공주대학교 화학공학부

(2015년 11월 23일 접수, 2015년 11월 26일 심사, 2015년 11월 28일 채택)

Comparison of Adsorption Performance of Ammonia and Formaldehyde Gas Using Adsorbents Prepared from Water Treatment Sludge and Impregnated Activated Carbon

Choul Ho Lee, Nayoung Park, Goun Kim, and Jong-Ki Jeon[†]

Department of Chemical Engineering, Kongju National University, Cheonan 31080, Korea
(Received November 23, 2015; Revised November 26, 2015; Accepted November 28, 2015)

초 록

본 연구에서는 정수슬러지를 원료로 사용하여 펠렛형 흡착제를 제조하고 질소흡착법, XRD, XRF 및 암모니아 승온탈착법 등을 사용하여 물리·화학적 특성을 분석하였다. 정수슬러지 유래 펠렛형 흡착제와 침착활성탄의 암모니아 및 포름알데히드 기체의 흡착 성능을 비교하였다. 정수슬러지로부터 제조된 펠렛형 흡착제는 침착활성탄보다 표면적과 기공부피는 훨씬 작지만 암모니아를 훨씬 더 많이 흡착할 수 있었다. 이는 정수슬러지로부터 제조된 펠렛형 흡착제 표면에 산점이 훨씬 더 많이 분포해 있어서 화학흡착에 의해 암모니아를 흡착하기 때문이다. 반면에, 산성가스인 포름알데히드 가스 흡착의 경우는 넓은 표면적과 발달된 기공으로 인하여 침착활성탄의 흡착성능이 정수슬러지로부터 제조된 펠렛형 흡착제에 비해 훨씬 우수하였다.

Abstract

In this study, a pellet-type adsorbent was prepared by using the water-treatment sludge as a raw material, and its physical and chemical properties were analyzed through N₂-adsorption, XRD, XRF, and NH₃-TPD measurements. Adsorption performance for gaseous ammonia and formaldehyde was compared between the pellet-type adsorbents prepared from water-treatment sludge and the impregnated activated carbon. Although the surface area and pore volume of the pellet-type adsorbent produced from water-treatment sludge were much smaller than those of the impregnated activated carbon, the pellet-type adsorbent produced from water-treatment sludge could adsorb ammonia gas even more than that of using the impregnated activated carbon. The pellet-type adsorbent prepared from water-treatment sludge showed a superior adsorption capacity for ammonia which can be explained by chemical adsorption ascribed to the higher amount of acid sites on the pellet-type adsorbent prepared from water-treatment sludge. In the case of formaldehyde adsorption, the impregnated activated carbon was far superior to the adsorbent made from the water-treatment sludge, which can be attributed to the increased surface area of the impregnated activated carbon.

Keywords: water-treatment sludge, impregnated activated carbon, gas adsorption, ammonia, formaldehyde

1. 서 론

물 사용량이 증가함에 따라 정수처리 시설의 수 처리 양이 점차 증가하고 있다. 특히 상수원수의 오염과 고도정수시설의 도입에 따라 정수장에서 발생하는 슬러지 양이 매년 증가하고 있다[1]. 정수장에서 발생하는 슬러지는 매립, 해양투기 또는 재활용에 의해 처분하여 왔으나, 매립은 매립지의 확보에 어려움을 겪고 있고, 해양투기의 경우

는 처리비용이 상대적으로 저렴하지만 2013년부터 금지되었다. 따라서 정수슬러지를 자원화하여 재사용하게 되면 처리비용을 절감하고 매립장의 수명을 연장함과 동시에 2차 환경오염원을 차단하는 효과를 얻게 된다.

정수슬러지에는 다른 폐 슬러지에 비해 중금속 성분이 비교적 낮은 점에 착안하여 초지 및 농작물 제배를 위한 토양개량제로 사용되고 있으며 해안과 공공용지의 매립용 성토제, 단열제, 경량골재, 농업용 토양개량제 및 무기질 비료의 원료로 활용 가능성 제시되고 있다[1,2]. 또한 정수슬러지를 건조시켜 소각한 후에 그 소각재를 용융하여 재활용하는 방법이 연구된 바 있으나 에너지를 과다하게 사용하게 되므로 보다 효율적인 방법으로 재활용할 수 있는 기술개발이 요구된다[3].

[†] Corresponding Author: Kongju National University,
Department of Chemical Engineering, Cheonan 31080, Korea
Tel: +82-41-521-9363 e-mail: jkjeon@kongju.ac.kr

최근에 슬러지로부터 제조한 물질의 흡착 성능에 주목하여 활성탄을 대체하려는 다양한 연구들이 이루어진 바 있다[4-9]. 특히, 정수슬러지에는 알루미늄 성분이 다량 함유되어 있다는 점에 착안하여 흡착제 혹은 촉매 등의 용도로 사용되는 제올라이트 유사물질로 전환하는 것이 가능하다. 본 저자들은 사전 연구를 통해서 정수슬러지를 주원료로 사용하여 입상형 흡착제를 제조하고 이의 물리화학적 특성을 검토한 후, 트리메틸아민, 암모니아, 황화수소 및 포름알데히드 등 악취 물질의 흡착특성을 분석하여 보고한 바 있다[10-13]. 그러나 정수슬러지로부터 제조된 흡착제는 암모니아와 트리메틸아민 등의 염기성 가스에 대한 흡착 성능은 우수지만, 포름알데히드와 황화수소 등의 산성 가스에 대해서는 흡착능이 부족하다는 문제점이 남아있다. 따라서 정수슬러지로부터 제조된 흡착제는 염기성 가스와 산성가스를 포함하는 복합악취가 발생하는 곳에서의 사용에 제한을 받게 된다. 황화수소와 포름알데히드 등의 산성가스 제거용 흡착제로 일반적으로 활성탄에 산화제나 금속을 담지한 침착활성탄이 사용되고 있으나[8,14-18], 비용을 상승시키는 단점이 있다.

본 연구에서는 정수슬러지를 원료로 사용하여 흡착제 분말을 제조한 후, 압출공정을 통해서 펠렛형 흡착제를 제조하고, 물리·화학적 특성을 분석하였다. 정수슬러지 유래 펠렛형 흡착제와 침착활성탄으로 구성된 연속식 흡착베드를 사용하여 암모니아 및 포름알데히드의 파과 성능을 비교하였다. 또한 복합악취가스 제거용 탈취 공정에 적용하기 위한 하이브리드 시스템의 구현을 위하여, 정수슬러지 유래 흡착제와 침착활성탄을 병용한 흡착베드의 암모니아 및 포름알데히드의 파과 성능을 분석하였다.

2. 실험

2.1. 흡착제

정수슬러지를 이용한 펠렛형 흡착제 제조 방법은 다음과 같다. 정수장(K-water 고산정수장)으로부터 채취한 정수슬러지 1 kg, 증류수 400 g, 인산(85%, Junsei Chemical Co.) 100 g을 회분식 반응기에 투입하고, 373 K에서 2 h 동안 교반시켰다. 수열반응을 통해서 생성된 고체를 여과하여 증류수로 세척한 후 건조하면 슬러지 케이크가 생성되며, 분쇄기로 분쇄하여 분말 형태로 만들었다. 이렇게 만들어진 분말 100 g에 증류수 63 g과 메틸셀룰로스 5 g을 혼합한 후, 반죽기를 이용하여 충분히 반죽하였다. 성형을 위하여 쌍축 압출성형기(twin extruder)를 사용하였고 직경 4.5 mm인 셀(cell) 37개를 가진 다이(die)를 사용하였다. 위에서 언급한 반죽을 압출성형기에 투입하여 압출을 수행한 후, 입상 흡착제의 길이가 약 1.0 cm 정도가 되도록 절단하였다. 입상 흡착제는 110 °C로 유지되는 오븐에서 12 h 동안 건조한 후, 500 °C에서 3 h 동안 소성하여 사용하였다. 정수슬러지를 이용한 펠렛형 흡착제(adsorbent prepared from water-treatment sludge)는 약어로 'SA'라 표기하였다.

2.2. 흡착제 특성 분석

흡착제의 성분 분석은 형광 X-선 성분 분석기(XRF, SEA2220A)를 이용하여 분석을 하였다. 관구 목표 원소는 Rh이고, 분해능은 165 eV 정도의 진공상태의 실리콘 반도체 검출기를 사용하여 분석하였다. 침착활성탄의 금속 성분 분석은 유도결합 플라즈마 분광분석기(ICP) (OPTIMA 2000 DV, Perkin Elmer)를 사용하였다.

BEL Japan의 BELSORP-mini II 를 이용하여 -196 °C에서 질소흡착 실험을 수행하였다. 시료를 473 K에서 8 h 동안 전처리 후, 액체질소

온도에서 흡착 가스로 질소를 투입하여 질소 흡착-탈착 등온선을 얻은 후에, 표면적과 기공크기분포를 각각 BET와 BJH 방법을 이용하여 계산하였다.

XRD 분석은 Rigaku MiniFlex 600을 사용하였다. 40 kV, 15 mA의 generator를 이용하였고, 스캔 속도는 10 °/min의 속도로 분석하였다. 튜브는 Cu 타겟을 이용하였고, 검출기는 D/tex Ultra를 이용하여 분석하였다. 분석 범위는 5-100°까지 분석하였다.

흡착제의 산세기와 산점의 양을 분석하기 위하여 암모니아 승온 탈착 실험(NH₃-TPD)를 사용하였다. 암모니아 승온 탈착 실험은 BEL Japan Inc.의 BEL-CAT-B를 사용하여 분석하였다. 시료를 실온에서 200 °C까지 분당 15 °C의 가열속도로 헬륨 흐름(50 mL/min)하에서 탈기하였다. 200 °C에서 1 h 동안 유지한 후 100 °C로 냉각하였다. 100 °C에서 암모니아를 30 min 동안 흡착시킨 후 2 h 동안 헬륨을 흘려서 물리 흡착된 암모니아를 제거하였다. 분당 15 °C의 승온 속도로 550 °C까지 온도를 증가시키면서 탈착되는 암모니아를 열전도도 검출기(TCD)로 분석하였다.

2.3. 암모니아 및 포름알데히드 파과성능 측정

악취가스 파과성능 측정 실험은 아크릴 재질의 흡착탑(내경 2 cm, 높이 26.5 cm)에서 수행하였다. 소규모 작업장과 측사 등에서 배출되는 산성가스와 염기성 가스를 포함하는 복합 악취가스를 제거하기 위한 흡착베드는 대부분 카트리지로 형태로 제작하여 사용한다. 본 연구에서는 6개의 카트리지로 구성된 상업용 흡착베드를 모사하기 위하여 정수슬러지 유래 흡착제와 침착활성탄의 무게비를 6 : 0, 5 : 1, 4 : 2, 3 : 3, 2 : 4, 1 : 5 및 0 : 6으로 구성하였다. 흡착제의 총 무게는 약 7 g으로 고정하였다.

악취가스로는 질소에 희석된 암모니아(750 ppm) 또는 포름알데히드(350 ppm)를 각각 사용하였다. 입상흡착제를 흡착탑에 장착한 후에 상온, 1 atm 상태에서 기체의 유량을 질량유량조절기를 이용하여 일정한 속도로 흘렸다. 투입한 악취가스의 농도 대비 배출되는 악취가스의 농도가 5% 이상 검출되면 파과가 종료된 것으로 간주하였고 실험을 종료하였다. 암모니아 및 포름알데히드 파과 실험 유출물은 테들러 가스 샘플링 백(tedlar gas sampling bag)에 담아 검지관을 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 토론

3.1. 흡착제의 물리·화학적 특성

Figure 1에 정수슬러지로부터 제조된 펠렛형 흡착제의 질소흡착 등온선을 나타냈다. 낮은 상대압에서 흡착량이 급격한 상승을 보이는데 이는 미세기공 물질에서 나타나는 특징이다[19]. 한편, 상대압이 약 0.5 이상인 범위에서 흡착등온선과 탈착등온선이 다른 경로를 보이는 현상인 히스테리시스가 나타난다. 따라서 정수슬러지로부터 제조된 펠렛형 흡착제의 질소흡착 등온선은 IUPAC 분류에 의하여 IV형의 흡착 및 탈착등온선으로 분류할 수 있으며, 이 흡착제가 메조기공을 포함하는 물질임을 알 수 있다[19]. 또한, 히스테리시스 고리의 모양이 de Boer의 메조기공 분류에서 슬릿 모양 기공의 특징인 B유형과 유사함을 알 수 있다[19]. 정수슬러지로부터 제조된 펠렛형 흡착제의 기공크기 분포를 살펴보면 기공 직경이 10 nm 이상의 범위까지 매우 넓은 분포를 보이고 있다(Figure 1). 정수슬러지로부터 제조된 펠렛형 흡착제에 발달된 메조 기공은 펠렛 제조과정에서 바인더로 사용된 메틸셀룰로오스가 소성과정에서 기화되면서 형성된 것으로 판단된다.

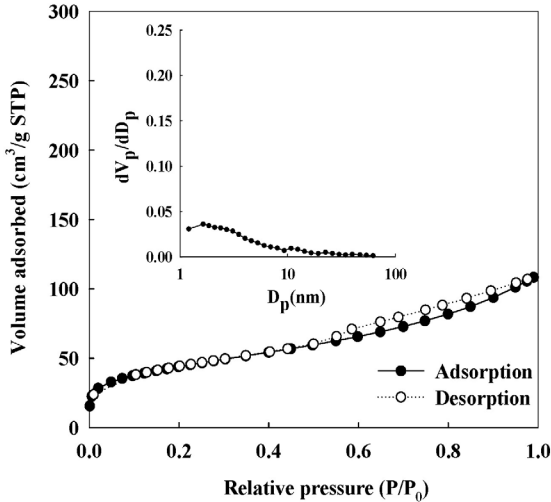


Figure 1. Nitrogen adsorption isotherm of the pellet-type adsorbent prepared from water-treatment sludge.

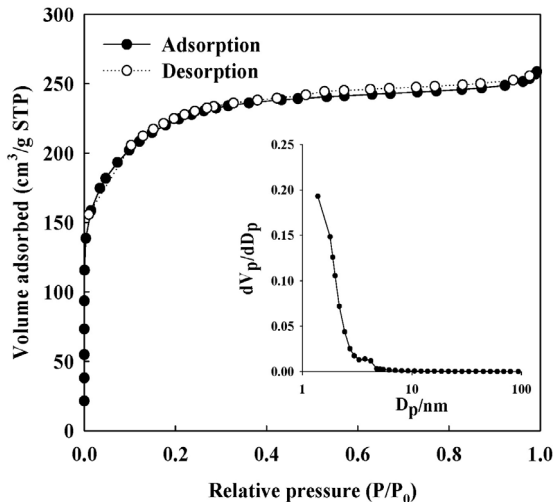


Figure 2. Nitrogen adsorption isotherm of the impregnated activated carbon.

Figure 2는 침착활성탄의 질소흡착 등온선이다. 상대압이 0.1 이하 구간에서 압력이 증가함에 따라 흡착량이 상당히 급격하게 증가하고, 상대압이 0.4 이상에서는 포화되어 더 이상 흡착량이 증가하지 않는 Langmuir형 등온선을 나타낸다. IUPAC 분류에 의한 1형 등온선의 전형적인 형태를 나타내며, 이는 침착활성탄이 미세기공을 가진 흡착제임을 의미한다[19]. Figure 2에 나타난 침착활성탄의 기공크기 분포를 보면 기공 직경이 5 nm 이하의 범위에서 상대적으로 좁은 기공 크기 분포를 보이고 있다.

Table 1에 정수슬러지로부터 제조된 펠렛형 흡착제(SA)와 침착활성탄(IC)의 BET 표면적과 기공부피를 나타냈다. 정수슬러지로부터 제조된 펠렛형 흡착제와 침착활성탄의 BET 표면적은 각각 157과 798 m²/g이었다. 또한 정수슬러지로부터 제조된 펠렛형 흡착제와 침착활성탄의 기공부피는 각각 0.17과 0.40 cm³/g이었다. 따라서 정수슬러지로부터 제조된 펠렛형 흡착제는 침착활성탄보다 표면적과 기공부피는 훨씬 작지만, 메조기공이 더 발달된 흡착제임을 확인하였다.

엑스선형광분석(XRF)로 분석한 결과, 정수슬러지로부터 제조된 펠

Table 1. Surface Area and Pore Volume of Adsorbents

Adsorbent	S _{BET} ^a (m ² /g)	V _p ^b (cm ³ /g)
SA ^c	157	0.17
IC ^d	798	0.40

^a Calculated in the range of relative pressure (P/P_0) = 0.05 - 0.20.

^b Measured at $P/P_0 = 0.99$.

^c Adsorbent prepared from water-treatment sludge.

^d Impregnated activate carbon.

Table 2. Result of Chemical Analysis of the Pellet-type Adsorbent Prepared from Water-treatment Sludge

Element	Al	Si	P	Fe	S	K
Quantity (wt%)	16.64	16.82	6.29	6.87	1.86	1.93

Table 3. Result of Chemical Analysis of the Impregnated Activated Carbon

Element	Fe	Sn	Mn	Cr	Cu
Quantity (wt%)	9.20	1.95	0.14	0.14	0.01

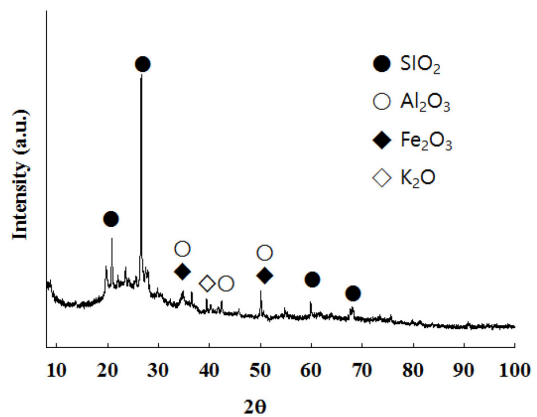


Figure 3. XRD pattern of the pellet-type adsorbent prepared from water-treatment sludge.

렛형 흡착제의 주요 구성 성분은 알루미늄, 실리카, 인, 철 등임을 알 수 있다(Table 2). 이러한 금속 성분들의 존재는 XRD 분석을 통해서도 확인되었으며 XRD 패턴을 분석하여 Figure 3에 나타냈다. 정수슬러지로부터 제조된 펠렛형 흡착제의 XRD 패턴을 XRD 표준 데이터베이스 라이브러리인 JCPDS와 비교한 결과, Al₂O₃와 SiO₂ 등의 산화물 특성 피크를 확인할 수 있었다. 한편, 침착활성탄을 유도결합 플라즈마 분광분석기로 분석한 결과를 Table 2에 나타냈으며, 철과 주석이 침착활성탄에 담지된 주요 금속 성분이며 망간 및 크롬 등이 소량 존재함을 알 수 있다.

3.2. 흡착제의 산 특성

정수슬러지로부터 제조된 펠렛형 흡착제(SA)와 침착활성탄(IC)의 산 특성을 암모니아 승온탈착실험(NH₃-TPD)을 통해서 분석하였다. Figure 4는 NH₃-TPD 결과를 나타낸 그래프이다. NH₃-TPD 곡선은 산

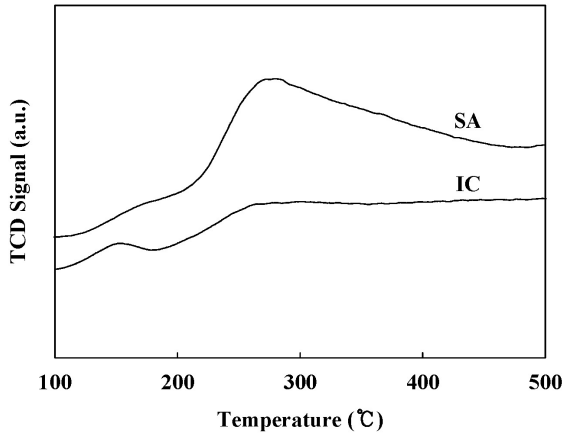


Figure 4. Temperature-programmed desorption of ammonia over the adsorbent prepared from water-treatment sludge (SA) and the impregnated activated carbon (IC).

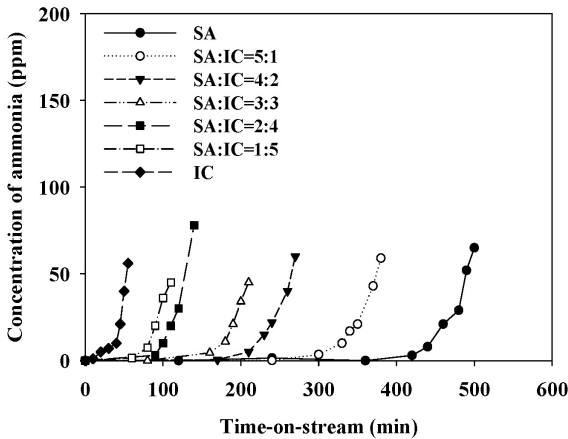


Figure 5. Breakthrough curves of ammonia over hybrid system.

의 세기와 산점의 양을 알기위해 유용하게 사용되고 있으며, 피크의 적분 면적은 암모니아의 탈착량을 나타내는 것으로서 산점의 양을 나타낸다[20]. 정수슬러지로부터 제조된 펠렛형 흡착제(SA)는 암모니아의 탈착 온도가 275 °C 근처에 최대점을 보이면서 폭이 넓은 피크를 나타내고 있어서 중간 세기의 산점이 다량 분포해 있는 것을 알 수 있다.

침착활성탄(IC)의 암모니아 탈착 곡선을 살펴보면, 피크의 크기가 정수슬러지로부터 제조된 펠렛형 흡착제(SA)에 비해서 매우 작다. 즉, 침착활성탄(IC)의 총 산점의 양은 정수슬러지로부터 제조된 펠렛형 흡착제(SA)와 비교하여 훨씬 적다는 것을 알 수 있다. 또한, 침착활성탄(IC)은 암모니아의 탈착 온도가 150 °C와 260 °C 근처에 최대점을 보이는 두 개의 피크를 나타내고 있어서 약한 세기의 산점과 중간 세기의 산점이 소량 분포해 있는 것을 알 수 있다. 따라서, 침착활성탄(IC)의 산점의 양이 적은 것은 물론이고 산의 세기도 정수슬러지로부터 제조된 펠렛형 흡착제(SA)에 비해 약하다는 것을 확인할 수 있었다.

3.3. 암모니아와 포름알데히드 기체 흡착 성능

Figure 5는 흡착베드에 동일한 질량의 펠렛형 흡착제 시료(약 7 g)를 장착하고, 질소에 희석된 암모니아 가스(750 ppm)의 파과 실험 결과를 보여주는 그래프이다. 200 cc/min의 유량(GHSV 955/h)으로 질

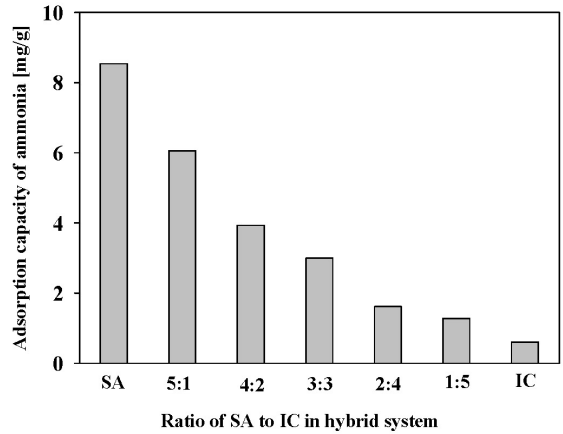


Figure 6. Adsorption capacity of ammonia over hybrid system.

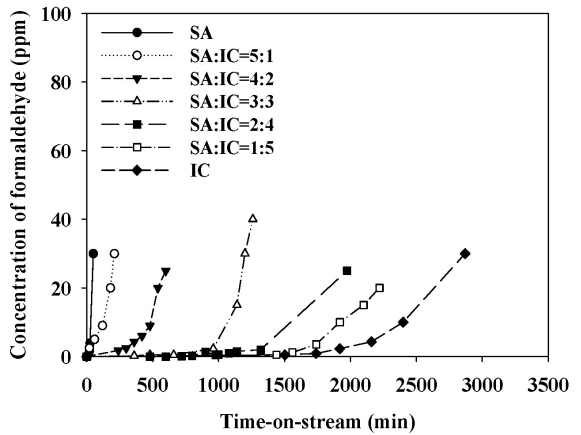


Figure 7. Breakthrough curves of formaldehyde over hybrid system.

소에 희석된 NH₃ 가스를 연속적으로 흘려준 다음, 흡착베드를 통과한 가스를 일정한 시간 간격으로 포집하여 농도를 측정하였다. 투입한 가스의 암모니아 농도 대비 배출되는 가스의 암모니아 농도가 5% 이상 검출되는 시간을 파과시간으로 판단하였다. 침착활성탄(IC)을 사용한 흡착베드에서는 파과시간이 49 min이었는데, 정수슬러지로부터 제조된 펠렛형 흡착제(SA)만 사용한 흡착베드에서는 파과시간이 약 10배에 해당하는 485 min이었다. 파과시간까지의 침착활성탄(IC)과 정수슬러지로부터 제조된 펠렛형 흡착제(SA)의 암모니아 흡착량은 각각 0.6 mg/g-adsorbent 및 8.5 mg/g-adsorbent로 나타났다(Figure 6).

일반적으로 흡착제의 흡착성능은 비표면적에 비례해서 나타난다 [21]. 정수슬러지로부터 제조된 펠렛형 흡착제와 침착활성탄의 BET 표면적은 각각 157과 798 m²/g이므로, 정수슬러지로부터 제조된 펠렛형 흡착제의 암모니아 흡착량이 침착활성탄에 비해서 훨씬 우수한 것은 흡착제의 표면적에 의해 설명될 수 없다. NH₃-TPD 분석 결과로부터 정수슬러지로부터 제조된 펠렛형 흡착제는 침착활성탄에 비해 훨씬 많은 양의 산점을 보유하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 정수슬러지로부터 제조된 펠렛형 흡착제는 암모니아의 화학흡착에 유리함을 알 수 있다. 결과적으로, 정수슬러지로부터 제조된 펠렛형 흡착제는 침착활성탄에 비해 표면적이 훨씬 작지만, 화학흡착에 의해 암모니아를 효과적으로 제거할 수 있다.

Figure 7은 흡착베드에 약 7 g의 흡착제를 장착하고, 질소에 희석된 포름알데히드 가스(350 ppm)의 파과 실험 결과를 보여주는 그래프이

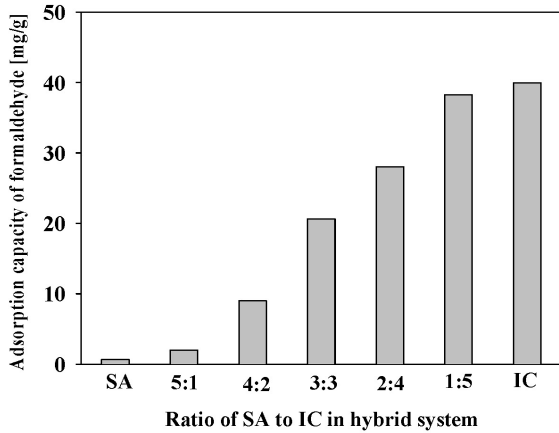


Figure 8. Adsorption capacity of formaldehyde over hybrid system.

다. 기체의 유량을 300 cc/min으로 유지하여 GHSV가 1,432/h가 되도록 하였다. 흡착베드를 통과한 가스를 일정한 시간 간격으로 알미늄 백에 포집하여 농도를 측정하였다. 침착활성탄(IC)을 사용한 흡착베드에서는 과과시간이 약 2500 min이었으나, 정수슬러지로부터 제조된 펠렛형 흡착제(SA)만 사용한 흡착베드에서는 과과시간이 약 50분에 불과했다. 과과시간까지의 침착활성탄(IC)과 정수슬러지로부터 제조된 펠렛형 흡착제(SA)의 암모니아 흡착량은 각각 33.6 mg/g-adsorbent 및 0.8 mg/g-adsorbent로 나타났다(Figure 8). 이와 같은 결과는 정수슬러지로부터 제조된 펠렛형 흡착제 상의 풍부한 산점이 포름알데히드와 같은 산성가스의 화학흡착에 기여하지 않기 때문으로 여겨진다. 한편, 침착활성탄의 경우는 넓은 표면적과 발달된 기공, 그리고 표면의 반응성으로 인하여 포름알데히드 흡착능이 우수하고 잘 알려져 있다[22,23].

한편, 복합악취가스 제거용 탈취 공정에 적용하기 위한 하이브리드 시스템의 구현을 위하여, 정수슬러지 유래 흡착제와 침착활성탄을 병용한 흡착베드의 암모니아 및 포름알데히드의 과과 성능을 분석하였다. Figure 5는 정수슬러지 유래 펠렛형 흡착제와 침착활성탄으로 구성된 하이브리드 흡착베드를 사용하여 암모니아 가스 과과 실험 결과를 보여주는 그래프이다. 이로부터 계산한 하이브리드 흡착베드의 암모니아 가스의 흡착량을 Figure 6에 나타냈는데, 하이브리드 시스템 중의 정수슬러지 유래 펠렛형 흡착제의 함량과 암모니아 가스의 흡착량이 선형적으로 비례함을 알 수 있다. 포름알데히드 가스 흡착량의 경우는 이와는 반대로 침착활성탄의 함량과 선형적으로 비례함을 알 수 있다(Figure 8). 이 결과는 각종 사업장에서 발생하는 복합악취의 성분에 따라서 효율적인 흡착베드를 설계하는 데에 유용할 것으로 판단된다.

4. 결 론

정수슬러지로부터 제조된 펠렛형 흡착제는 침착활성탄보다 표면적과 기공부피는 훨씬 작지만, 메조기공이 더 발달된 흡착제임을 확인하였다. 정수슬러지로부터 제조된 펠렛형 흡착제 표면에는 중간 세기의 산점이 다량 분포해 있으나, 침착활성탄에는 정수슬러지로부터 제조된 펠렛형 흡착제에 비해 산점이 훨씬 적었다. 따라서, 정수슬러지로부터 제조된 펠렛형 흡착제는 침착활성탄에 비해 표면적이 훨씬 작지만, 화학흡착에 의해 암모니아를 효과적으로 제거할 수 있다. 반면에,

산성가스인 포름알데히드 가스 흡착의 경우는 넓은 표면적과 발달된 기공으로 인하여 침착활성탄의 흡착능이 정수슬러지로부터 제조된 펠렛형 흡착제에 비해 훨씬 우수하였다. 정수슬러지 유래 펠렛형 흡착제와 침착활성탄으로 구성된 하이브리드 흡착베드는 각종 사업장에서 발생하는 복합악취를 제거하는데 유용할 것으로 판단된다.

감 사

이 논문은 2014년 공주대학교 학술연구지원사업의 연구지원에 의하여 연구되었음.

References

1. K. C. Kang, Y. H. Kim, J. M. Kim, C. H. Lee, and S. W. Rhee, Synthesis of $AlPO_4$ -type mesoporous materials using alum sludge, *Appl. Chem. Eng.*, **22**, 173-177 (2011).
2. I. H. Kim, *Study on the using water purifying $AlPO_4$ -based zeolite synthesis and ammonia removal*, PhD Dissertation, Chonbuk National University, Chonbuk, Korea (2007).
3. J. M. Kim, M. K. Kim, J. M. Lee, C. H. Lee, S. W. Lee, D. J. Choi, and J. M. La, Method of manufacturing a building material composition eco-friendly, *Korea Patent* 10-1041094 (2011).
4. G. R. Xu, Z. C. Yan, Y. C. Wang, and N. Wang, Recycle of alum recovered from water treatment sludge in chemically enhanced primary treatment, *J. Hazard. Mater.*, **161**, 663-669 (2009).
5. M. Seredych, C. Strydom, and T. J. Bandosz, Effect of fly ash addition on the removal of hydrogen sulfide from biogas and air on sewage sludge-based composite adsorbents, *Waste Manage.*, **28**, 1983-1992 (2008).
6. J. Y. Lee, S. H. Park, J. K. Jeon, K. S. Yoo, S. S. Kim, and Y. K. Park, The removal of low concentration formaldehyde over sewage sludge char treated using various methods, *Korean J. Chem. Eng.*, **28**, 1556-1560 (2011).
7. Z. H. Pan, J. Y. Tian, G. R. Xu, J. J. Li, and G. B. Li, Characteristics of adsorbents made from biological, chemical and hybrid sludges and their effect on organics removal in wastewater treatment, *Water Res.*, **45**, 819-827 (2011).
8. W. Yuan and T. J. Bandosz, Removal of hydrogen sulfide from biogas on sludge-derived adsorbents, *Fuel*, **86**, 2736-2746 (2007).
9. G. R. Xu, W. T. Zhang, and G. B. Li, Adsorbent obtained from CEPT sludge in wastewater chemically enhanced treatment, *Water Res.*, **39**, 5175-5185 (2005).
10. N. Park, J. Bae, C. H. Lee, and J. K. Jeon, Extrusion of pellet-type adsorbents employed with alum sludge and H_2S removal performance, *Clean Technol.*, **19**, 121-127 (2013).
11. J. Bae, N. 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**, 352-357 (2013).
12. J. Bae, N. Park, G. Kim, C. H. Lee, Y. K. Park, and J. K. Jeon, Characteristics of pellet-type adsorbents prepared from water treatment sludge and their effect on trimethylamine removal, *Korean J. Chem. Eng.*, **31**, 624-629 (2014).
13. N. Park, J. Bae, G. Kim, J. K. Jeon, Y. K. Park, and C. H. Lee, Synthesis of nanoporous adsorbents using alum sludge, *J. Nanosci. Nanotechnol.*, **15**, 5321-5325 (2015).

14. T. J. Bandosz, On the adsorption/oxidation of hydrogen sulfide on unmodified activated carbon at temperatures near ambient, *J. Colloids. Interf. Sci.*, **246**, 1-20 (2002).
15. F. Adib, A. Bagreev, and T. J. Bandosz, Adsorption/oxidation of hydrogen sulfide on nitrogen modified activated carbons, *Langmuir*, **16**, 1980-1986 (2000).
16. A. Bagreev and T. J. Bandosz, A role of sodium hydroxide in the process of hydrogen sulfide adsorption/oxidation on caustic-impregnated activated carbons, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **41**, 672-679 (2002).
17. L. M. Le Leuch, A. Subrenat, and P. Le Cloirec, Hydrogen sulfide and ammonia removal on activated carbon fiber cloth-supported metal oxides, *Environ. Technol.*, **26**, 1243-1254 (2005).
18. M. Polovina, B. Kaluderovic, and B. Babic, Ammonia adsorption on chemically modified activated carbon cloth, *J. Serb. Chem. Soc.*, **63**, 653-659 (1998).
19. J. Rouquerol, D. Avnir, C. W. Fairbridge, D. H. Everet, J. H. Haynes, N. Pernicone, J. Ramsay, K. S. Sing, and K. K. Unger, Recommendations for the characterization of porous solids. *Pure Appl. Chem.*, **66**, 1739-1758 (1994).
20. G. Liu, Z. Mi, L. Wang, and X. Zhang, Kinetics of dicyclopentadiene hydrogenation over Pd/Al₂O₃ catalyst, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **44**, 3846-3851 (2005).
21. S. Lee, J. Kim, C. Y. Yun, and J. Yi, Adsorption characteristics of the sericite and diatomite for ammonia gas, *Clean Technology*, **12**, 175-181 (2006).
22. S. Tanada, N. Kawasaki, T. Nakamura, M. Araki, and M. Isomura, Removal of formaldehyde by activated carbons containing amino groups, *J. Colloid Interface Sci.*, **214**, 106-108 (1999).
23. C. Ma, X. Li, and T. Zhu, In situ growth of a carbon interphase between carbon fibres and a polycarbosilane-derived silicon carbide matrix, *Carbon*, **49**, 2869-2872 (2011).