

# 정수 슬러지를 재활용한 펠렛형 흡착제 상에서 염기성 악취 물질의 흡착속도상수

김고운 · 박나영 · 배정현 · 전종기 · 이철호<sup>†</sup>

공주대학교 화학공학부

(2014년 1월 3일 접수, 2014년 1월 9일 심사, 2014년 1월 11일 채택)

## Adsorption Kinetic Constants for Basic Odorant on Pellet-type Adsorbents Recycled from Water-treatment Sludge

Goun Kim, Nayoung Park, Junghyun Bae, Jong-Ki Jeon, and Choul Ho Lee<sup>†</sup>

Department of Chemical Engineering, Kongju National University, Cheonan 331-717, Korea

(Received January 3, 2013; Revised January 9, 2014; Accepted January 11, 2013)

정수 슬러지를 재활용하여 제조한 펠렛형 흡착제의 트리메틸아민과 암모니아의 흡착 특성을 연구하였다. 펠렛형 흡착제를 110 °C에서 건조 처리 했을 때보다 500 °C에서 소성했을 때 BET 표면적과 기공 부피가 증가하는 것을 알 수 있었다. 정수 슬러지를 재활용하여 제조한 펠렛형 흡착제는 브뢴스테드 산점과 루이스 산점을 보유하는 것을 확인하였다. 흡착질 가스인 트리메틸아민과 암모니아가 일정한 농도로 흡착제 층으로 유입되고, 흡착제의 증량과 흡착질의 선속도를 변화시키면서 흡착질 가스의 통과시간을 측정하였다. Wheeler의 흡착속도식을 사용하여 트리메틸아민과 암모니아의 동적흡착용량과 흡착속도상수를 결정하였다. 동적흡착용량과 흡착속도상수가 흡착질 가스의 선속도에 따라 변화함을 알 수 있었다. 정수 슬러지를 재활용하여 제조한 펠렛형 흡착제 상에서, 다양한 흡착조건에서 트리메틸아민과 암모니아의 통과시간을 예측하기 위한 실험식을 도출하였다.

The adsorption characteristics of the pellet-type adsorbent prepared from water treatment sludge for trimethylamine and ammonia were studied. The surface area and pore volume of the pellet-type adsorbent increased during calcination at 500 °C. It was confirmed that the adsorbent prepared from water treatment sludge contained Brönsted and Lewis acid sites. The breakthrough time of the adsorbent for both trimethylamine and ammonia was measured at different adsorbent weights and linear velocities while maintaining constant amounts of trimethylamine and ammonia. The kinetic saturation capacity and the adsorption rate constant for trimethylamine and ammonia were determined at different linear velocities by using the Wheeler equation. It was found that the kinetic saturation capacity and the adsorption rate constant were dependent on the linear velocity. An experimental equation could be derived to predict the breakthrough time of the adsorbent prepared from water treatment sludge for trimethylamine and ammonia at different adsorption conditions.

**Keywords:** water treatment sludge; trimethylamine; ammonia; adsorbent; adsorption rate constant

### 1. 서 론

도시화와 상수원수의 오염에 따라 정수 처리 시설에서 발생하는 슬러지의 양도 증가하게 되었다. 정수 슬러지는 처리 방법과 화합물의 종류 및 사용량에 따라서 조성이 다양하다. 정수 슬러지에는 중금속과 유해 화학물질이 함유되어 있기 때문에 퇴비화, 매립성토재, 토양 개량제, 무기질 비료 등으로 재활용하기가 어렵다. 매립은 매립지의 확보에 어려움으로 거의 중단된 상태이고 해양투기는 처리비용이 상대적으로 저렴한 이점이 있으나 2013년부터 런던 협약이 개정됨에 따

라 해양배출이 제한되고 있다. 따라서 정수 처리 시설에서 슬러지의 발생량을 최소화시키는 방안이나 슬러지를 재활용하여 유효하게 이용하는 자원화 기술 개발이 시급히 요구되고 있는 실정이다[1,2].

국내에서 발생하는 정수 슬러지는 무기질 성분 중 알루미늄이 약 30% 함유되어 있으므로, 이를 활용하여 악취 물질들을 제거하는데 유용한 펠렛형 흡착제를 제조하여 전량 수입에 의존하고 있는 황철탄을 대체하려는 연구가 최근에 진행되었다[3-6].

축사 또는 산업현장에서 발생하는 악취물질들로부터 인간의 호흡기를 보호하기 위한 노력은 매우 중요하다. 악취물질은 pH에 따라 염기성계, 산성계 및 중성계로 구분될 수 있는데, 트리메틸아민과 암모니아는 염기성계에 속하고 황화수소, 메틸메르캅탄, 프로피온산, 노르말부틸산, 이소발레르산 등은 산성계에 속하며, 황화메틸, 이황화메틸, 아세트알데히드 등은 중성계에 속한다[7].

본 저자들은 정수 처리 시설로부터 배출되는 슬러지를 원료로 이용하여 펠렛형 흡착제를 제조하고, 펠렛형 흡착제의 물리적 특성 및 화

<sup>†</sup> Corresponding Author: Kongju National University, Department of Chemical Engineering, 1223-24 Cheonan-daero, Subuk, Cheonan, Chungnam 331-717, Korea  
Tel: +82-41-521-9355 e-mail: chlee@kongju.ac.kr

Table 1. Experimental Conditions for TMA Adsorption

V <sub>L</sub> (cm/s)	Q (cc/min)	GHSV (1/h)	Weight of adsorbent (g)			
			1st	2nd	3rd	4th
0.50	94	9.65 - 14.96	2.5	3.0	3.5	4.0
0.75	141	9.97 - 18.70	3.0	4.0	5.0	6.0
1.01	190	11.00 - 14.75	5.5	6.5	7.5	8.5
1.25	236	10.02 - 23.48	4.0	6.0	8.0	10.0
1.75	330	10.00 - 31.83	5.0	8.0	11.0	14.0
2.25	424	11.44 - 31.39	6.0	9.0	12.0	15.0
2.65	500	13.72 - 31.83	7.0	10.0	13.0	16.0



Figure 1. Pellet-type adsorbents prepared from water-treatment sludge.

학적 특성과 트리메틸아민의 흡착 특성을 분석한 결과를 보고한 바 있다[4-6]. 흡착제를 이용한 흡착 장치의 scale-up이나 현장에 적용하기 위한 흡착탑 설계과정에서 과과시간을 예측하기 위한 흡착 속도식이 필수적이다[8]. 본 연구에서는 정수 슬러지를 재활용하여 제조한 펠렛형 흡착제를 사용하여 염기성 대기 악취 물질인 트리메틸아민(trimethylamine, TMA)과 암모니아의 동적 흡착 특성을 검토하여, 흡착탑을 통과하는 흡착질의 유속 및 흡착제의 중량 변화에 따라 흡착질 가스의 과과시간을 예측할 수 있는 실험식을 제시하고자 하였다.

## 2. 실험

### 2.1. 정수 슬러지 흡착제 제조

실험에 사용한 펠렛형 흡착제는 참고문헌[4,5]과 같은 방법으로 제조한 후, 전기로에서 500 °C로 3 h 동안 소성하였으며 본 실험에서 제조한 펠렛형 흡착제의 외관을 Figure 1에 보였다.

### 2.2. 흡착제의 특성 분석

펠렛형 흡착제의 화학조성을 정량 및 정성 분석할 수 있는 형광엑스선 성분 분석기(XRF, SEA2220A)를 이용하여 분석하였다. 검출기는

실리콘 반도체 검출기를 사용하였으며, 분해능은 165 eV 정도이다.

X-선 회절 분석기로 펠렛형 흡착제 분말의 상 분석을 수행하였다. X-선 회절 분석은 MiniFlex600 (Rigaku)를 사용하였고, 분석 범위는 5 ~ 100°까지이며 0.05 °/sec의 scan speed로 측정하였다. X-ray generator는 600 W (40 kV, 15 mA), tube는 Cu target, detector는 D/tex Ultra를 이용하였다.

질소 흡·탈착 실험을 통해서 흡착제의 표면적 및 기공 특성을 분석하였다. 약 0.2 g 정도의 흡착제를 샘플 port에 넣은 후, 200 °C에서 8 h 동안 처리한 후, BEL JAPAN, INC.의 BEL SORP mini II를 이용하여 -196 °C에서 분석하였다. 흡착 가스로 질소를 흘려주어 질소 흡·탈착 등온선을 얻은 후에 비표면적과 기공크기를 각각 Brunauer-Emmett-Teller (BET)와 Barrett-Joyner-Halenda (BJH) 방법을 이용하여 계산하였다.

흡착제의 산 특성을 Pyridine-FTIR을 사용하여 분석하였다. 흡착제 시료 0.013 g을 직경 13 mm의 mold에 넣고 압력을 가하여 원형의 disk로 만들었다. 흡착제 disk가 장착된 cell을 진공상태에서 350 °C까지 가열한 뒤 다시 상온으로 온도를 떨어뜨린 후에 background 스펙트럼을 측정하였다. 상온에서 pyridine을 일정량(약 3 torr 미만) 흘려주어 40 min 흡착시킨 후, 다시 진공상태로 유지시킨 후에 cell의 온도를 150 °C까지 상승시키고 IR 스펙트럼을 측정하였다.

### 2.3. 동적 흡착 특성 실험

트리메틸아민의 동적 흡착 특성 실험에 사용된 흡착질은 질소에 희석된 트리메틸아민(1000 ppm, Rigas)이다. 내경 2 cm, 길이 26.5 cm의 아크릴 재질 흡착탑에 펠렛형 흡착제를 충전하여 실험을 수행하였다. 혼합가스의 유량은 질량 유량 조절기를 이용하여 조절하였다. 트리메틸아민 과과실험 유출물의 분석은 on-line으로 직접 연결된 가스크로마토그래프(GC)를 이용하여 분석하였다. GC는 Donam Instruments Inc.의 DS 6200을 사용하였고, GC에 사용된 column은 Carbowax Amine Capillary Column (length 30 m × diameter 0.53 mm × film thickness 1.0 μm)이다. 그리고 흡착탑을 통과한 혼합가스의 트리메틸아민 농도가 20 ppm 이상, 즉 투입한 트리메틸아민의 2%가 검출되면 과과가 진행된 상태로 판단하였다. Table 1에 트리메틸아민 동적 흡착 특성 실험 조건을 나타냈다.

암모니아 동적 흡착 특성 실험은 질소에 희석된 암모니아(1000 ppm, Rigas)이다. 흡착탑과 유량 조절 장치는 앞에서 설명한 트리메틸

**Table 2. Experimental Conditions for Ammonia Adsorption**

V <sub>L</sub> (cm/s)	Q (cc/min)	GHSV (1/h)	Weight of adsorbent (g)			
			1st	2nd	3rd	4th
0.50	94	11.51 - 17.60	2.0	2.5	3	3.5
0.75	141	12.82 - 23.62	2.5	3.0	3.5	4.0
1.01	190	13.15 - 27.49	3.0	4.0	5.0	6.0
1.25	236	15.33 - 30.05	3.0	4.0	5.0	6.0
1.75	330	18.11 - 32.83	4.0	5.0	6.0	7.0
2.25	424	26.99 - 43.54	4.0	5.0	6.0	7.0
2.65	500	26.53 - 39.79	5.0	6.0	7.0	8.0

**Table 3. Results of Chemical Analysis of Pellet-Type Adsorbents**

	Quantity (wt%) <sup>a</sup>	
	After drying <sup>b</sup>	After calcination <sup>c</sup>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	28.2	30.9
SiO <sub>2</sub>	34.1	36.0
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	15.2	14.2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.5	9.9
SO <sub>3</sub>	6.3	4.8
K <sub>2</sub> O	2.6	2.5

<sup>a</sup>Dry basis quantity measured by fluorescence X-ray element analyzer.

<sup>b</sup>Drying condition: 110 °C, 24 h

<sup>c</sup>Calcination condition: 500 °C, 4 h

아민 흡착 장치와 동일하다. 암모니아 파괴실험 유출물의 분석은 일정한 시간 간격 동안 폴리에스테르 재질의 테들러 가스 샘플링 백(3 l, 240 mm × 260 mm)으로 포집하여 암모니아 검출용 검지관을 이용하여 분석하였다. 검지관의 검출 범위가 ~30 ppm이고, 흡인회수는 5 회이다. Table 2에 암모니아 동적 흡착 특성 실험 조건을 나타냈다.

**2.4. 흡착속도상수 유도**

흡착제 상에서 일어나는 흡착에 관한 정보를 흡착모델식을 이용하여 얻을 수 있으며, 본 연구에서는 흡착제에서의 흡착거동과 함께 유체흐름의 유동과 흡착제의 구조적 특성에 의해 해석될 수 있는 동적 흡착 모델식을 적용하였다. 고정층 column에 유입되는 흡착질의 농도와 유출되는 농도에 대한 물질 수지식으로부터 Wheeler 등에 의해 제안된 흡착모델식을 사용하였으며, 식은 아래에 나타내었다[8,9].

$$t_b = \frac{W_e}{C_0 Q} \left[ W - \frac{\rho Q \ln(C_0/C_X)}{K_V} \right] \tag{1}$$

*t<sub>b</sub>* : 파괴 시간      *W<sub>e</sub>* : 동적흡착용량 (g/g)  
*C<sub>0</sub>* : 유입농도      *Q* : 유속 (cm<sup>3</sup>/min)  
*C<sub>X</sub>* : 유출농도      *ρ* : 흡착제 bulk density (g/cm<sup>3</sup>)  
*W* : 흡착제 중량      *K<sub>V</sub>* : 속도상수 (min<sup>-1</sup>)

유입농도를 일정하게 유지하고, 흡착제 중량과 유속 변화에 따른 파괴시간 변화를 측정하여 해당 유속별 그래프를 도시하고, 이 그래프의 기울기와 절편으로부터 해당 유속에서의 흡착제의 특성값인 동적 흡착용량과 흡착 속도상수를 도출하였다. 이렇게 구해진 동적 흡착용량과 속도상수를 이용하여 주어진 실험조건에서 파괴시간 예측이 가능하나 임의의 유속에서 파괴시간 예측 시 해당 유속에서의 *W<sub>e</sub>*와 *K<sub>V</sub>*가 결정되어야 한다. 그러나 유속 변화 시에 *W<sub>e</sub>*와 *K<sub>V</sub>*가 동시에 변화함으로 파괴시간 예측을 위한 대표값 결정이 제한된다[8].

Jonas와 Rehrmann 등은 기체 흡착질 유속과 흡착 속도상수와와의 관계식을 정립하였으며 이 관계식을 이용하여 흡착질 유속 변화에 대한 흡착 속도상수를 이론적으로 구하는 것이 가능하게 되었다[10]. Jonas와 Rehrmann 등에 의해 제안된 식은 아래와 같다.

$$K_V = \frac{a + b}{1 + (a/b)\exp[-(a+b)cV_L]} \tag{2}$$

*K<sub>V</sub>* : 흡착속도상수 [sec<sup>-1</sup>]  
*V<sub>L</sub>* : 흡착질 선속도 [cm/sec]  
*a, b, c*: 상수

식 (2)를 이용하여 선속도변화에 따른 흡착속도상수값을 대입하여 *a, b, c* 상수값을 구하여 흡착속도상수의 계산된 값을 도출하였다.

단면적이 A[m<sup>2</sup>]인 고정층 칼럼에 총괄밀도가 *ρ* [g/cm<sup>3</sup>]인 흡착제가 충전 높이 *l* [cm] 만큼 중량 *W* [g]로 충전되었을 때 충전된 흡착제 층을 흡착질이 선속도 *V<sub>L</sub>* [cm/sec]로 통과할 경우의 파괴실험 예측을 위한 실험식을 식 (3) 및 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다[8].

$$t_b = \alpha J + \beta \tag{3}$$

$$J = \frac{16(D-2d)^2 W^2}{\pi^2 D^6 \rho V_L K_V} \tag{4}$$

단, *J*는 호환계수로서 식 (3)에 사용하기 위하여 적용한 임의기호이며, *α*와 *β*는 상수이다.

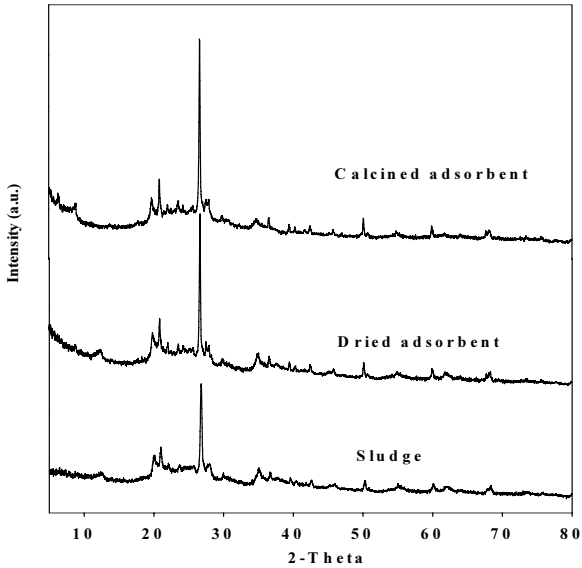


Figure 2. XRD patterns of the samples.

Table 4. BET Surface Area and Pore Volume of Pellet-Type Adsorbents

Adsorbent	S <sub>BET</sub> (m <sup>2</sup> /g)	V <sub>P</sub> (cm <sup>3</sup> /g)
Dried adsorbent	61	0.09
Calcined adsorbent	153	0.17

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 흡착제의 특성 분석

Table 3은 펠렛형 흡착제의 화학조성을 알아보기 위해 XRF로 분석한 결과이다. 흡착제의 주성분은 Al과 Si이며, 정수 슬러지를 처리하는 과정에서 첨가하는 인산의 경우 110 °C에서 건조하거나 또는 500 °C로 소성한 후에도 계속 존재하는 것을 알 수 있다. 특히 500 °C로 소성한 후에는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 SiO<sub>2</sub>를 제외한 다른 성분들의 함량은 감소하는데 반해 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 SiO<sub>2</sub>의 함량은 증가하여 각각 30.9 wt%와 36.0 wt%로 나타났다.

X-선 회절 분석기(XRD)로 측정된 결과는 Figure 2와 같다. XRD 그래프를 확인해 보면, 26° 정도에서 높게 나타나는 peak는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 나타내며, 정수 슬러지의 무기질 성분 중 알루미늄이 다량 함유되고 있는 사실과 일치했다[1]. 그리고 Figure 2를 보면 펠렛형 흡착제의 110 °C 건조 후와 500 °C 소성 후에도 결정 구조는 큰 변화를 보이지 않았다.

Table 4는 질소를 흡·탈착시켰을 때, 비표면적과 기공부피 등을 나타낸 결과이다. 500 °C에서 소성하면 비표면적과 기공부피가 증가하는 것을 알 수 있으며, 153 m<sup>2</sup>/g의 비표면적과 0.17 cm<sup>3</sup>/g의 기공부피를 보유한 흡착제가 제조되었음을 알 수 있다. Figure 3에 펠렛형 흡착제의 N<sub>2</sub> 흡착 및 탈착 등온선을 나타냈다. 낮은 상대 압력에서 흡착량이 급격한 상승을 보여서 IUPAC의 기공 유형 분류에서 I형과 유사함을 알 수 있다. 즉 미세기공을 많이 보유한 물질의 특징을 나타내고 있다. 한편, 상대압이 0.5 이상인 범위에서 흡착등온선과 탈착등온선이 다른 경로를 보이는 현상인 히스테리시스가 나타난다. 따라서 IUPAC 분류에 의하여 IV형의 흡착 및 탈착등온선으로 분류할 수 있으며, 이 흡착제가 메조기공을 포함하는 물질임을 알 수 있다[11]. 또

Table 5. The Ranges of Experimental Variables for Deriving the Adsorption Kinetic Equation

Linear velocity V <sub>L</sub> (cm/s)	0.50 - 2.65
Sludge adsorbent weight W (g)	2.00 - 16.00
Column diameter D (cm)	2.00
Average particle size d (cm)	0.44
Bulk density of sludge adsorbent ρ (g/cm <sup>3</sup> )	0.50
Influent concentration C <sub>0</sub> (ppm)	1000

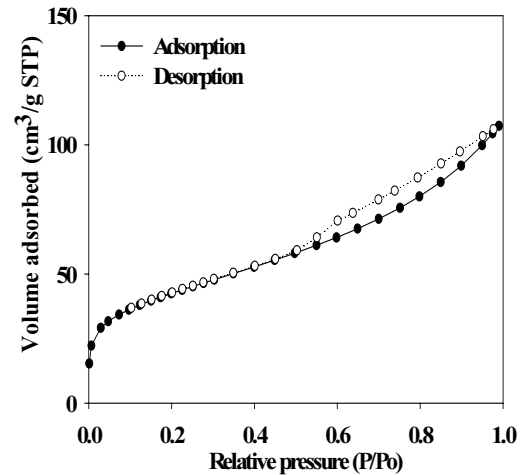


Figure 3. N<sub>2</sub>-adsorption-desorption isotherms of pellet-type adsorbents.

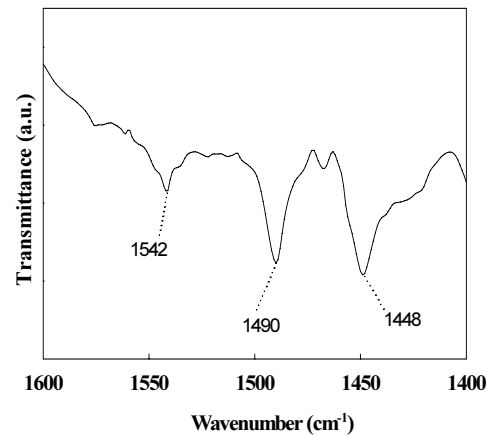


Figure 4. FTIR of adsorbed pyridine over the calcined adsorbent. The sample was desorbed under 10<sup>-3</sup> torr at 423 K.

한, 히스테리시스 고리의 모양이 de Boer의 메조기공 분류에서 슬릿 모양 기공의 특징을 보인다는 것을 알 수 있다[11].

소성한 흡착제의 산 특성을 피리딘 흡착 IR을 통해서 분석하였다. 1542 cm<sup>-1</sup>, 1490 cm<sup>-1</sup> 및 1448 cm<sup>-1</sup>에서의 3개 밴드가 뚜렷하게 검출되었는데, 각각 브뢴스테드 산점, 브뢴스테드/루이스 산점, 그리고 루이스 산점으로 할당될 수 있다[12-14]. 즉, 본 연구에서 제조한 펠렛형 흡착제는 산점을 가지고 있으며, 브뢴스테드 산점과 루이스 산점으로 구성됨을 알 수 있다.

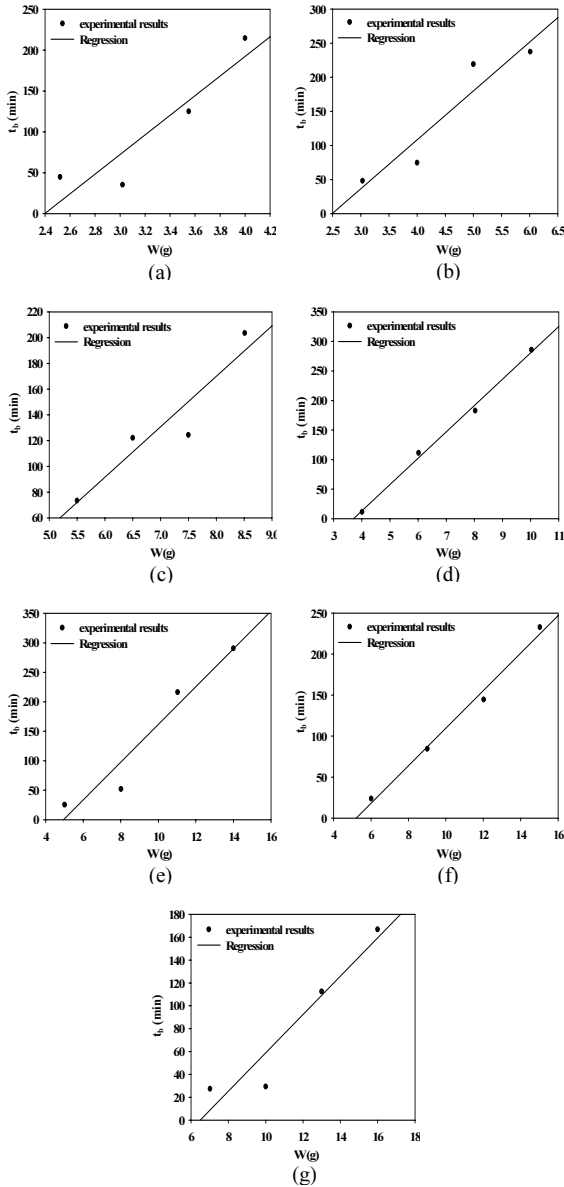


Figure 5. TMA breakthrough time as a weight(W) for sludge adsorbent: (a)  $V_L = 0.50$  cm/sec, (b)  $V_L = 0.75$  cm/sec, (c)  $V_L = 1.01$  cm/sec, (d)  $V_L = 1.25$  cm/sec, (e)  $V_L = 1.75$  cm/sec, (f)  $V_L = 2.25$  cm/sec, (g)  $V_L = 2.65$  cm/sec.

### 3.2. 흡착 속도상수 도출

식 (1)을 적용하기 위하여 흡착제 겉보기 밀도는 메스실린더를 사용하여 측정하였으며, 유입농도( $C_0$ )는 트리메틸아민과 암모니아 모두 1000 ppm이고, 유출농도가 유입농도의 2% (20 ppm) 이상이 되면 과파가 진행된 상태로 판단하였다. 흡착속도상수 도출을 위한 과파실험 조건은 Table 5와 같다. 트리메틸아민과 암모니아의 유입농도를 일정하게 유지하고, 흡착제 중량과 유속 변화에 따른 과파시간 변화를 측정하여 유속별로 흡착제의 중량과 과파시간의 관계를 구하여 Figure 5와 Figure 6에 각각 도시하였다. 흡착제의 중량과 과파시간은 선형관계가 있음을 확인할 수 있다. 이 그래프들의 기울기와 y 절편을 구하여 직선식을 Table 6과 Table 7에 나타냈다. 기울기와 y 절편을 식 (1)에 대입하여 해당 유속에서의 동적흡착용량( $W_c$ )과 흡착속도상수( $K_v$ )

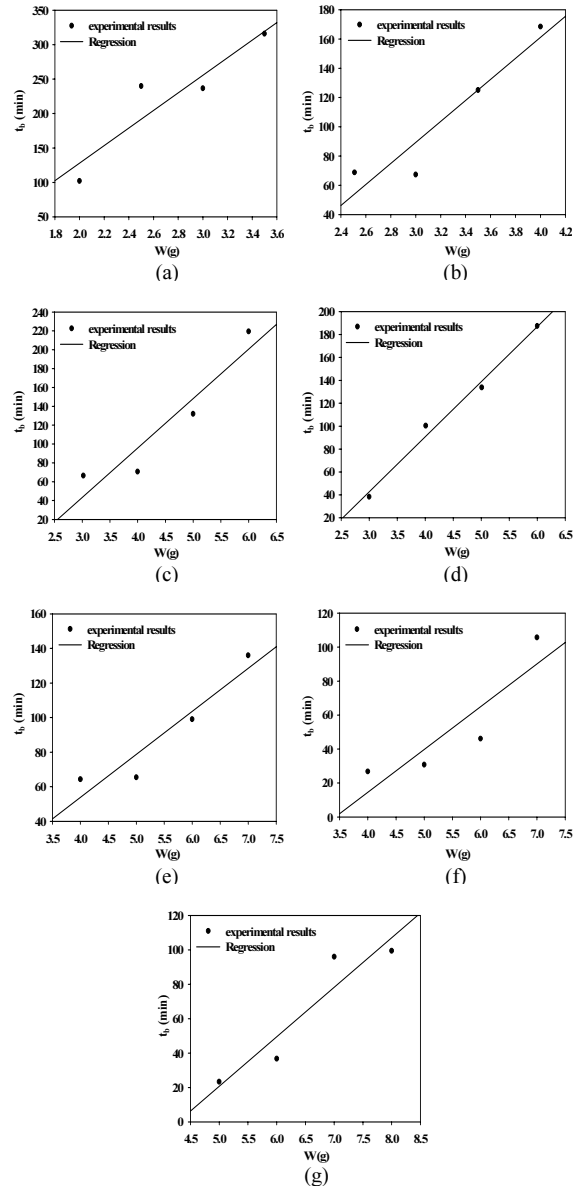


Figure 6. Ammonia breakthrough time as a weight(W) for sludge adsorbent: (a)  $V_L = 0.50$  cm/sec, (b)  $V_L = 0.75$  cm/sec, (c)  $V_L = 1.01$  cm/sec, (d)  $V_L = 1.25$  cm/sec, (e)  $V_L = 1.75$  cm/sec, (f)  $V_L = 2.25$  cm/sec, (g)  $V_L = 2.65$  cm/sec.

를 도출하였다.

Table 6을 보면 트리메틸아민의 과파실험에서 유속이 0.5 cm/s에서 2.65 cm/s 범위에서 동적흡착용량이 0.02 - 0.03 g/g-adsorbent 범위에 있음을 알 수 있다. 흡착속도상수는 유속이 0.5 cm/s에서 2.65 cm/s까지 증가함에 따라  $1.28 \text{ sec}^{-1}$  -  $2.65 \text{ sec}^{-1}$  범위에 있음을 알 수 있다. Table 7의 암모니아 과파실험 결과를 보면, 유속이 0.50 cm/s - 2.65 cm/s 범위에서 동적흡착용량이 0.022 - 0.038 g/g-adsorbent 범위에 있으며, 흡착속도상수는  $1.28 \text{ sec}^{-1}$  -  $2.51 \text{ sec}^{-1}$  범위에 있음을 알 수 있다.

선속도변화에 따른 흡착속도상수의 실험값을 Jonas와 Rehrmann 등에 의해 제안된 식 (2)에 대입하여 a, b, c 상수값을 구한 다음에 흡착속도상수의 계산값을 구할 수 있다[10]. 식 (2)의 상수 a, b, c 값을 polymath 프로그램을 이용하여 구한 결과 트리메틸아민의 경우는 a,

**Table 6. Regression Equation of Breakthrough Time, Adsorption Capacity and Adsorption Rate Constant of TMA Adsorption Obtained Using the Wheeler and Jonas Equation**

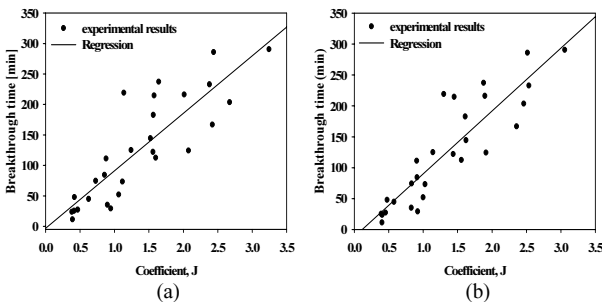
$V_L$ (cm/s)	Regression equation of breakthrough time <sup>1)</sup>	$W_c$ <sup>1)</sup> (g-TMA/ g-adsorbent)	$K_v$ <sup>1)</sup> (experimental) (1/sec)	$K_v$ <sup>2)</sup> (calculated) (1/sec)
0.50	$t_b=119.9 W-287.2$	0.030	1.28	1.39
0.75	$t_b=71.7 W-178.6$	0.027	1.84	1.61
1.01	$t_b=39.2 W-143.7$	0.020	1.69	1.83
1.25	$t_b=44.6 W-165.1$	0.028	2.08	2.01
1.75	$t_b=32.0 W-158.3$	0.028	2.17	2.31
2.25	$t_b=22.9 W-119.2$	0.026	2.65	2.49
2.65	$t_b=16.8 W-108.7$	0.022	2.51	2.58

1) calculated by the equation (1)  
2) calculated by the equation (2)

**Table 7. Regression Equation of Breakthrough Time, Adsorption Capacity and Adsorption Rate Constant of Ammonia Adsorption Obtained Using the Wheeler and Jonas Equation**

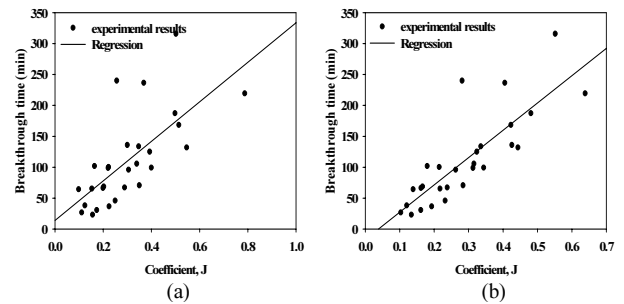
$V_L$ (cm/s)	Regression equation of breakthrough time <sup>1)</sup>	$W_c$ <sup>1)</sup> (g-TMA/ g-adsorbent)	$K_v$ <sup>1)</sup> (experimental) (1/sec)	$K_v$ <sup>2)</sup> (calculated) (1/sec)
0.50	$t_b=127.6W-127.3$	0.032	3.07	2.80
0.75	$t_b=71.9W-126.4$	0.027	2.61	3.17
1.01	$t_b=52.4W-113.9$	0.026	2.85	3.51
1.25	$t_b=48.1W-101.6$	0.030	3.64	3.77
1.75	$t_b=24.9W-45.6$	0.022	5.87	4.14
2.25	$t_b=25.2W-86.3$	0.028	4.04	4.34
2.65	$t_b=28.8W-123.2$	0.038	3.81	4.43

1) calculated by the equation (1)  
2) calculated by the equation (2)



**Figure 7. TMA breakthrough time as a function of J coefficient using  $K_v$ : (a) from experimental data, (b) calculated by eqn (2).**

b, c는 각각 1.769, 0.945, 및 0.495로 결정되었다. 또한 암모니아의 경우는 a, b, c가 각각 2.577, 1.965, 및 0.325로 나타났다. 이 값들을 사용하여 식 (2)로부터 계산한 이론적인 속도상수 값을 Table 6과 Table 7에 나타내었다. 식 (1)을 이용하여 실험값으로부터 구한 속도상수값과 식 (2)를 이용하여 이론적으로 계산한 속도상수값이 큰 차이를 보이지 않았다. 트리메틸아민의 경우는 유속이 0.50 cm/s - 2.65 cm/s 범



**Figure 8. Ammonia breakthrough time as a function of J coefficient using  $K_v$ : (a) from experimental data, (b) calculated by eqn (2).**

위에서 흡착속도상수가 1.39 sec<sup>-1</sup>부터 2.58 sec<sup>-1</sup>까지 증가함을 알 수 있다. 또한 암모니아의 경우는 유속이 0.50 cm/s - 2.65 cm/s 범위에서 흡착속도상수가 2.80 sec<sup>-1</sup>부터 4.43 sec<sup>-1</sup>까지 증가하였다. 즉 본 연구에서 동적흡착 실험을 실시한 결과 유속변화에 따라 동적흡착 용량과 흡착속도상수가 변화함을 확인하였다. 즉, 임의의 유속에서 과거시

간 예측을 위해서는 해당 유속에서의 동적흡착용량( $W_d$ )과 흡착속도 상수( $K_v$ )가 결정되어야 한다.

앞 절에서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 기체 흡착질 유속과 흡착속도상수와의 관계식인 식 (2)를 사용하였으며, 이 관계식을 이용하여 과과실험 예측을 위한 식 (3) 및 식 (4)를 사용하였다. 주어진 실험 조건에서 중량 및 유속 변화에 따른 식 (4)의 호환계수 J 값을 구하였다. 호환계수 J 값을 계산할 때 흡착속도상수  $k_v$ 는 실험으로부터 구한 값을 사용하고, J 값의 변화에 대한 트리메틸아민과 암모니아 과과 시간의 변화를 각각 Figure 7(a)와 Figure 8(a)에 나타냈다. 또한 속도상수  $k_v$ 를 식 (2)로부터 계산한 값을 사용하고, J 값의 변화에 대한 트리메틸아민과 암모니아 과과시간의 변화를 각각 Figure 7(b)와 Figure 8(b)에 나타냈다. Figure 7과 Figure 8에서 보는 바와 같이 호환계수(J)의 변화에 따른 과과시간의 변화가 선형적인 관계로 변화하였으며 호환계수와 과과시간이 상관관계에 있음을 알 수 있었다. 또한  $k_v$ 를 실험으로부터 구한 값을 사용한 J 값과 과과시간의 변화의 상관관계는  $k_v$ 를 계산값을 사용한 J 값과 과과시간의 변화의 상관관계와 비교해보면 큰 차이를 보이지 않았다. 즉, 본 연구에서 적용한 실험식들이 타당성을 가진다는 것을 알 수 있었다.

#### 4. 결 론

정수장 슬러지로부터 제조된 가공 분말을 압출하여 펠렛형 흡착제를 제조하였다. 펠렛형 흡착제를 110 °C에서 건조 처리 했을 때보다 500 °C에서 소성했을 때 BET 표면적과 기공 부피가 증가하는 것을 알 수 있었다. 펠렛형 흡착제는 브룬스테드 산점과 루이스 산점을 보유하는 것을 확인하였다. 500 °C에서 소성한 펠렛형 흡착제를 사용하고, 흡착제의 중량과 트리메틸아민 또는 암모니아가 함유된 기상 약취 물질의 유속을 변수로 하여 과과실험을 수행하여 흡착탑의 설계에 필요한 흡착 속도 상수를 구했다. Wheeler의 흡착 속도식을 이용하여 트리메틸아민 또는 암모니아가 함유된 기상 약취 물질의 선속도가 0.50 - 2.65 cm/s인 범위에서 과과시간 예측을 위한 실험식을 아래와 같이 도출하였다.

트리메틸아민의 흡착속도 상수 ;

$$K_v[s^{-1}] = \frac{2.71}{1 + 1.87 \exp(-1.34 V_L[cm/s])}$$

암모니아의 흡착속도 상수 ;

$$K_v[s^{-1}] = \frac{4.54}{1 + 1.31 \exp(-1.48 V_L[cm/s])}$$

#### 감 사

This work was supported by the research grant of the Kongju National University in 2012.

#### 참 고 문 헌

1. 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).
2. D. H. Yun, B. H. Lee, and Y. T. Kim, Strength and leaching characteristics of water sludge-added lightweight soil considering reinforcing material and layer, *JKGES.*, **13**, 75-84 (2012).
3. K. C. Kang, Y. H. Kim, J. M. Kim, C. H. Lee, and S. W. Rhee, Synthesis of AlPO<sub>4</sub>-type mesoporous materials using alum sludge, *Appl. Chem. Eng.*, **22**, 173-177 (2011).
4. N. Park, J. Bae, C. H. Lee, and J. K. Jeon, Extrusion of pellet-type adsorbents employed with alum sludge and H<sub>2</sub>S removal performance, *Clean Technol.*, **19**, 121-127 (2013).
5. 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).
6. 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.*, in press (2014).
7. I. H. Byeon, D. H. Choi, G. S. Oh, G. H. Lee, S. C. Han, and B. Y. Lee, A functional adsorbent using sludge and the adsorbent production method using thereof, Korea patent, 10-1200629 (2012).
8. J. S. Lim, C. S. Kim, and W. S. Ahn, The adsorption characteristics of ASC activated carbon for DMMP, IMPF acid the prediction of vapor breakthrough time, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **12**, 428-433 (2001).
9. J. Wu, O. Claesson, I. Fangmark, and L. G. Hammarstrom, A systematic investigation of the overall rate coefficient in the Wheeler - Jonas equation for adsorption on dry activated carbons, *Carbon*, **43**, 481-490 (2005).
10. L. A. Jonas, and J. A. Rehrmann, The rate of gas adsorption by activated carbon original research article, *Carbon*, **12**, 95-101 (1974).
11. 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).
12. G. T. Palomino, J. J. C. Pascual, M. R. Delgado, J. B. Parra, and C. O. Areal, FT-IR studies on the acidity of gallium-substituted mesoporous MCM-41 silica, *Mater. Chem. Phys.*, **85**, 145-150 (2004).
13. M. I. Zaki, M. A. Hasan, F. A. Al-Sagheer, and L. Pasupulety, In situ FTIR spectra of pyridine adsorbed on SiO<sub>2</sub> - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub> and CeO<sub>2</sub>: general considerations for the identification of acid sites on surfaces of finely divided metal oxides, *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects*, **190**, 261-274 (2001).
14. E. O. Lee, S. Y. Yun, Y. K. Park, S. Y. Jeong, J. S. Han, and J. K. Jeon, Selective hydroisomerization of n-dodecane over platinum supported on SAPO-11, *J. Ind. Eng. Chem.*, **20**, 775-780 (2014).