

## 하수슬러지의 수증기 활성화법을 이용한 흡착제 제조와 흡착특성

정동현 · 전영남<sup>†</sup>

조선대학교 환경공학부 · BK21 바이오가스기반수소생산 사업팀

(2007년 3월 16일 접수, 2007년 4월 19일 채택)

### Preparation of Adsorbent from Sewage Sludge by Steam Activation and Adsorption Characteristic

Dong Hyun Jung · Young Nam Chun<sup>†</sup>

Department of Environmental Engineering, Chosun University · BK21 Team for Hydrogen Production

**ABSTRACT** : Recently, the treat of sludge is usually progressed by ocean disposal. But it will be totally banned by content of its heavy metal according to London Dumping Convention, gradually. The stable way of treat of sewage sludge should be examined urgently. To solve the problem, recently, there are efficient and environment-oriented method. One of them is to produce adsorbent through the activation. This study produces adsorbent through steam activation. As basic experiment, optimum activation condition for preparation of good adsorbent is researched through study of the following variables : steam flow rate, activated temperature, activation time. As the result of this with standard on Iodine adsorptivity, it is chosen, that steam flow rate "30 mL/hr", activation temperature "500°C", activation time "60 minutes". At the time, Iodine adsorptivity and yield shown that 228.4 mg/g, 77.23%. And also, by using nitrogen adsorption, SEM and EDS are confirmed that pore development, specific surface area, mean pore size, chemical component and content. Pore developed by steam activation is also confirmed that it is micropore.

**Key Words** : Sewage Sludge, Steam Activation, Adsorbent, Iodine Adsorptivity, Nitrogen Adsorption

**요약** : 현재 슬러지의 처리는 주로 해양투기에 의해 진행되는데 런던협약에 의해 슬러지 내 중금속 함량에 따라 점진적으로 해양투기가 완전 금지되어진다. 이에 하수슬러지의 안정적 처리 방안이 시급히 검토되어야 한다. 그 대책으로 최근 슬러지의 능률적이고 친환경적인 처리를 위한 방법 중 하나로 활성화를 통한 흡착제 제조가 부각되고 있다. 본 연구는 하수슬러지를 수증기 활성화법을 이용하여 흡착제로 활용하기 위한 기초연구로서 양질의 흡착제를 제조하기 위한 변수별 연구를 통한 최적 활성화조건을 연구하였다. 그 결과 요오드 흡착능을 기준으로 하여 변수별 연구를 통해 수증기 주입량 30 mL/hr, 활성화 온도 500°C, 활성화 시간 60분으로 선정되었다. 이 때 요오드 흡착능과 수율은 228.4 mg/g, 77.23%로 나타났다. 또한 질소 흡착, SEM, EDS를 이용하여 수증기 활성화에 따른 세공 발달, 비표면적, 평균 세공경 및 화학적 성상과 함량을 파악하였다. 수증기 활성화를 통해 발달되는 세공은 주로 미세 세공임을 확인하였다.

**주제어** : 하수 슬러지, 수증기 활성화, 흡착제, 요오드 흡착능, 질소 흡착

## 1. 서론

현재 산업과 도시의 발달로 많은 양의 폐기물이 발생되고 증가하고 있지만 환경에 대한 관심의 증가는 폐기물을 최소화하고 줄이기 위한 새로운 기술과 방법들을 결과적으로 가져오게 했다. 하지만 폐기물의 한 종류인 하수슬러지는 최근 문제가 되고 있다. 이는 하수슬러지를 폐기물 관리법에 의해 매립을 할 수 없고, 거의 대부분 해양투기에 의해 처리되고 있지만 이 또한 2007년부터는 런던협약에 의해 하수슬러지의 중금속함량에 따라 점진적으로 금지되기 때문이다. 이에 하수슬러지의 안정적 처리·처분 방안이 시급히 검토되어야 한다.

그 대책으로 소각, 도로포장재, 비료화, 벽돌제조 등 다양

한 방법<sup>1~4)</sup>을 사용하여 슬러지 처리를 시도하였다. 하지만 소각의 경우 슬러지 감량화와 열에너지 회수라는 면에서 장점이 있지만 황산화물과 질소 산화물등 대기오염물질과 다이옥신과 같은 유해가스를 배출하고 중금속을 함유한 소각재 발생 등의 문제가 있다. 도로포장재, 비료화, 벽돌제조의 경우 슬러지 내에 함유된 중금속의 용출 가능성과 다양한 성상으로 인한 특정 물질회수 등의 문제점이 있다.

이와 같이 문제가 되고 있는 슬러지의 능률적이고 친환경적인 처리를 위한 방법 중 하나로 최근 활성화를 통한 흡착제의 제조가 부각되고 있다. 이는 고품질의 부피를 감소시키고 무산소 반응으로 다이옥신의 문제도 거의 발생하지 않는다. 또한 활성화된 슬러지 내부의 중금속이 활성화에 의해 생성된 미세 세공에 침착되어 용출되지 않으므로 흡착제로 활용이 가능하다.

관련 활성화탄의 세공 발달은 활성화탄 원료와 활성화 과정의

<sup>†</sup> Corresponding author  
E-mail: ynchun@chosun.ac.kr  
Tel: 062-230-7156

Fax: 062-230-7156

형태 등 많은 요소에 의해 영향을 받는다. 화학적 활성화의 경우 활성화 약품에 따라 다른 세공발달이 나타나고 물리적 활성화는 높은 온도에서 주로 수증기, CO<sub>2</sub>를 주입하여 수행한다. 물리적 활성화를 통한 세공발달은 CO나 CO+H<sub>2</sub>가 촉(char)분자로부터 탄소원자가 제거되고 입자 내부의 선택적 산화가 일어나 세공이 형성되어 진행된다.<sup>5)</sup>

본 연구에서는 일반적으로 활성화탄 재료로 사용되는 아자각과 같은 자연 탄화성 물질이 아닌 하수슬러지를 사용하여 수증기 활성화법으로 양질의 활성화탄을 제조하고자 최적 활성화 조건과 흡착특성을 연구하였다. 이를 위해 수증기 주입량, 활성화 온도, 활성화 시간을 변화시켜 변수별 연구를 수행하였다.

## 2. 실험 및 분석방법

### 2.1. 실험장치

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 수증기 활성화 모사장치로서 수증기 활성화 반응기, 온도 측정 장치, 질소가스 및 수증기 공급 장치로 구성되어 있다.

수증기 활성화 반응기는 원형관(재질: stainless steel)으로 내경은 85 mm, 길이는 500 mm이다. 반응기의 상단부는 배출가스와 온도 측정과 하단부는 질소가스와 수증기의 공급을 위해 각각 두 개의 구멍이 위치하고 있다. 내부에는 반응기 내 유체의 흐름을 고르게 유지하기 위해 분배판을 설치하였으며, 시료를 반응기에 넣고 빼고, 활성화될 수 있도록 400 mesh 용기가 있다. 활성화 반응기 온도유지를 위해 1,000℃까지 온도조절이 가능한 제어장치가 장착된 전기로(CLF-1320)를 사용하였다.

온도 측정 장치는 K-type 열전대와 데이터 분석 장치(fluke hydra data logger)로 구성되어 있다. 온도 측정은 반응기 출구와 반응기 중심부 그리고 수증기 발생 장치 출구부에 K-type 열전대를 장착하여 데이터 분석 장치에 연결하여 온도를 연속적으로 확인할 수 있도록 하였다.

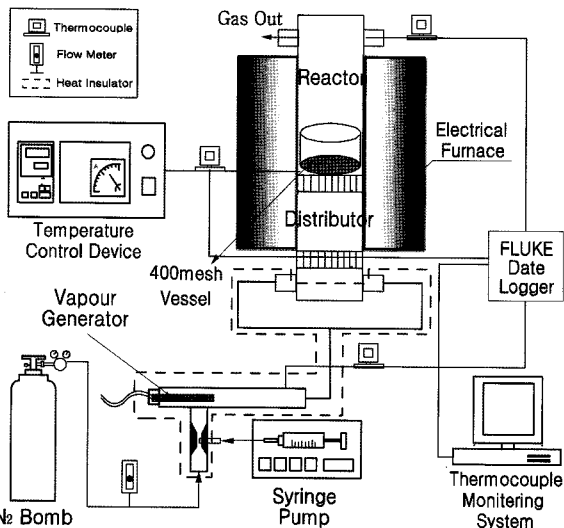


Fig. 1. Schematic of the experimental set up.

질소가스 및 수증기 공급 장치는 질소가스 유입부와 수증기 발생 장치로 구성되어 있다. 질소가스 유입부는 고압질소 봄베, 압력조절장치, 유량계, 분배판으로 구성되어 있다. 수증기 발생 장치는 실린지 펌프, 히터봉, 단열재, 벤츄리 소켓으로 구성되어 있다. 수증기 발생 장치로 물을 일정하게 공급 시켜주기 위해 실린지 펌프(KDS 100, KDScientific)를 사용하였고, 히터봉은 물을 수증기로 만들기 위한 열원으로 450℃까지 온도유지가 가능하다. 수증기 발생 장치에 열손실을 최소화하기 위해 외부를 단열재로 감싸주었다. 또한 벤츄리 소켓은 공급되는 질소의 유량을 증가시켜 실린지 펌프에서 공급되는 물의 맺힘 현상을 방지하고 가열부로 날려 순간적으로 기화될 수 있도록 한다.

### 2.2. 실험방법

본 연구의 실험은 탄화/활성화 과정에서 반응기 내의 환원성 분위기 유지가 중요하다. 이에 환원성 분위기를 위해 질소가스를 100 mL/min으로 탄화/활성화 과정 중 지속적으로 주입하였다.

실험에 사용된 재료는 광주광역시 생활하수를 표준 활성화 슬러지법으로 처리하여 발생되는 탈수슬러지를 사용하였고, 이를 105~110℃의 온도 유지가 가능한 전기로를 이용하여 함수율 10%까지 건조시키고, 건조된 슬러지를 분쇄하여 0.25~0.5 mm로 입경을 일정하게 체분리 하였다. 탄화공정의 전처리로 반응기 내부를 환원성 분위기로 조성하며 온도를 6.7℃/min으로 증가시키며 탄화온도인 600℃까지 예열한 후 탄화 온도에 도달하면 탄화반응기 내부로 함수율 10%, 입경 0.25~0.5 mm로 건조된 슬러지(이하 건조슬러지)를 탄화시료로 주입하고 1시간 동안 탄화시킨다. 이러한 과정으로 만들어진 탄화물(이하 탄화슬러지)은 3N-HCl로 2시간 동안 끓여 산세척 한다. 산세척 후 수회 수세하여 탄화물 내 3N-HCl이 잔류하지 않도록 한다. 이를 활성화 시료(이하 산세척 탄화슬러지)로 사용한다.

활성화 실험을 위해 활성화 온도인 500℃까지 1시간 15분 동안 6.7℃/min씩 승온시켜 예열한다. 또한 실린지 펌프를 이용하여 수증기 발생 장치로 30 mL/hr의 유량으로 물을 공급시켜 수증기를 발생시킨다. 수증기 공급 및 반응기 내부 온도가 안정화 되면 활성화 시료를 넣어 1시간 동안 활성화시킨다. 이러한 과정을 통해 활성화물을 제조하였고, 요오드 흡착능에 의해 최적 활성화 조건을 결정하였다. 최적 활성화 슬러지 조건을 결정하기 위해 활성화 변수를 수증기 주입량 10~70 mL/hr, 활성화 온도 300~850℃, 활성화 시간 30~120분으로 각각 변화시켜 실험을 진행하였다.

### 2.3. 분석방법

활성화 최적화 조건을 결정하기 위하여 요오드 흡착능 시험<sup>6)</sup>을 하였고, 제조된 활성화슬러지의 흡착특성을 파악하기 위해 질소 흡착 분석을 하였다. 질소 흡착은 nanoPOROSITY (nanoPOROSITY-XQ, (주)미래SI)를 사용하여 기체입자(N<sub>2</sub>)의 피흡착가스로 300℃에서 가스의 압력을 0.001~1,000 Torr의 범위로 변화시켜가며 흡착현상에 의해 형성되는 흡착등

온선을 측정한다. 이를 통해 시료의 흡착특성을 해석하고, BET식에 적용하여 비표면적을 계산하고, 중간 세공(mesopore)의 경우 BJH식과 미세 세공(micropore)의 경우 HK식에 의해 세공분포 및 평균 세공경을 계산에 의해 산출한다.<sup>7)</sup> IUPAC(international union of pure and applied chemistry)에서는 세공의 크기를 세 가지로 구분하는데 미세 세공 20 Å 이하, 중간세공 20~500 Å, 거대 세공(micropore) 500 Å 이상으로 분류한다.<sup>8)</sup>

활성화에 따른 하수슬러지의 세공 발달을 비교하기 위해 전자주사현미경(S-4800, Hitachi)을 이용하였다. SEM(전자주사현미경)은 세공 발달을 관찰하기 위해 시료의 specimen표면에 백금 코팅해서 10,000배 확대하여 촬영한다. 또한 슬러지의 수증기 활성화에 의한 화학적 성장 및 함량을 파악하기 위해 EDS(7593-H, Horiba)로 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 전처리

Fig. 2는 산세척(3N-HCl)에 따른 흡착특성을 비교하기 위하여 탄화슬러지와 산세척한 탄화슬러지의 질소 흡착등온선을 비교한 것으로 흡착등온선은 6가지 형태(Type I~VI)<sup>9)</sup>로 분류된다.

Fig. 2의 탄화슬러지의 경우는 Type III과 Type IV의 중간 형태로 중간 세공과 거대 세공에서 세공 발달이 미비하게 진행된 것으로 보이는데 Fig. 2의 산세척한 탄화슬러지는 Type IV의 형태를 보이며 미세 세공에서 거대 세공에 이르기까지 세공 발달이 탄화슬러지에 비해 상당히 증가함을 알 수 있다. 또한 탄화슬러지의 산세척 유무에 따른 비표면적에서도 62.31 m<sup>2</sup>/g에서 231.25 m<sup>2</sup>/g로 크게 증가함을 볼 수 있다. 이는 탄화공정에서 제거되지 못하고 잔존하여 탄화슬러지의 세공을 막고 있는 타르나 오일 등의 휘발성분과 무기물을 산세척을 통해 용출시켰기 때문이다.<sup>9)</sup>

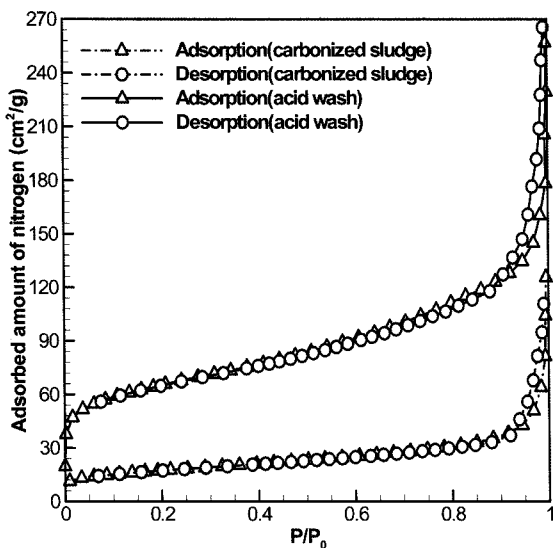


Fig. 2. Adsorption isotherm of nitrogen at carbonized sludge and acid washed carbonized sludge.

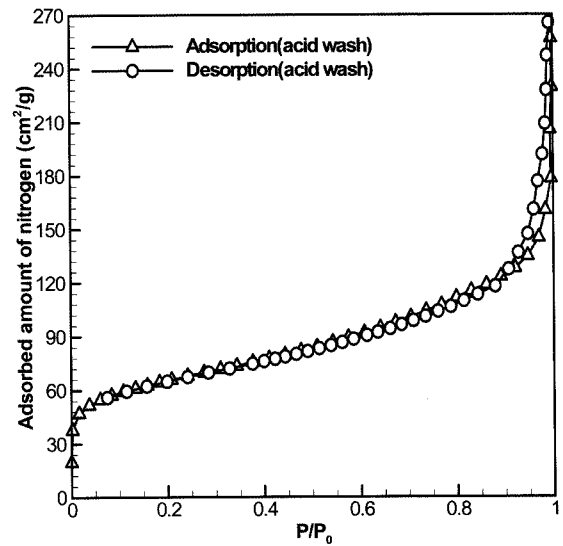
#### 3.2. 기준조건

본 연구는 하수슬러지 활성화 영향변수에 따른 반복 예비 실험을 통해 요오드 흡착능이 최대인 조건을 기준조건으로 설정하였으며, 그 때의 실험조건 및 실험결과는 Table 1에 나타났다.

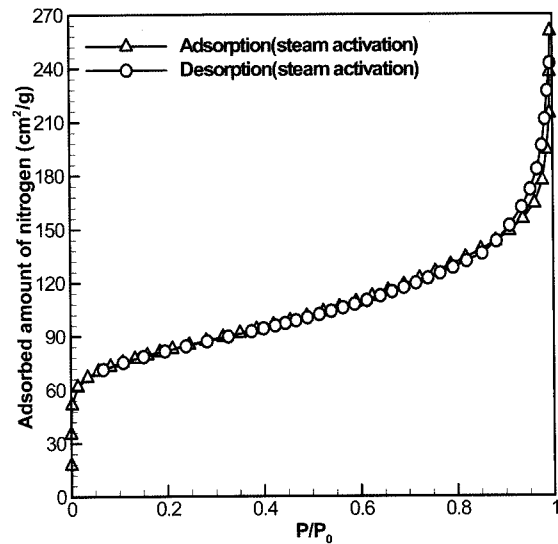
기준조건에서 최적 슬러지 활성화조건은 수증기 주입량 30 mL/hr, 활성화 온도 500°C, 활성화 시간 60분으로 결정

Table 1. Standard conditions and experimental data

Item	Condition	Value
Standard conditions	Steam flow rate(mL/hr)	30
	Activation temperature(°C)	500
	Activation time(min)	60
Experimental data	Iodine adsorptivity(mg/g)	228.4
	Yield(%)	77.23



(a) Carbonized sludge(acid wash)



(b) Activated sludge

Fig. 3. Adsorption isotherm of nitrogen at acid washed carbonized sludge and activated sludge.

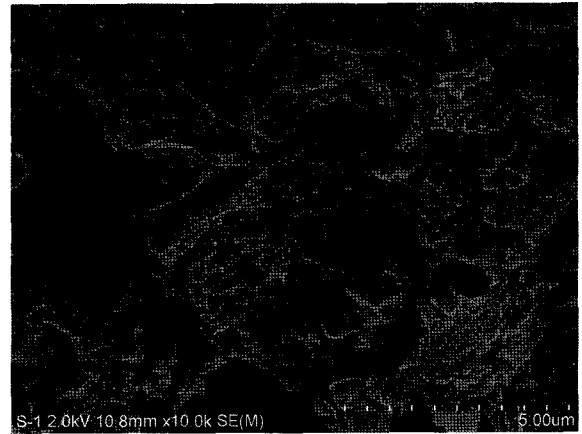
하였다. 이때 요오드 흡착능 228.4 mg/g, 수율 77.23%로 나타났다.

Fig. 3은 수증기 활성화에 의한 세공 발달 및 흡착특성을 파악하기 위한 질소 흡착등온선으로 산세척한 탄화슬러지와 최적 슬러지 활성화조건에서 제조된 활성화물(이하 활성화슬러지)을 비교한 것이다.

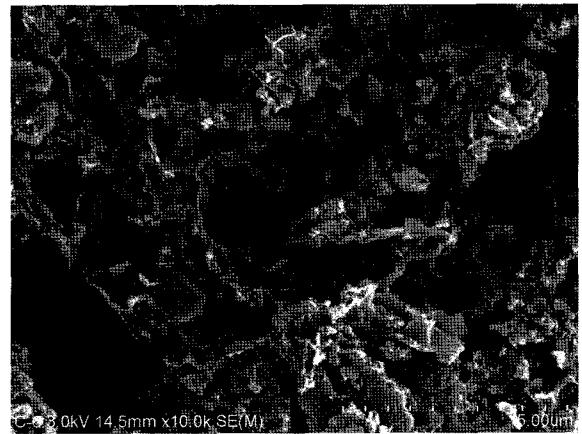
Fig. 3(a)와 (b)의 흡착등온선은 모두 Type IV의 형태를 나타내고 있다. Fig. 3의 흡착등온선 비교를 통해 활성화슬러지가 미세 세공에서 거대 세공에 이르기까지 전 구간에서 세공 발달이 증가한 것을 확인 할 수 있다. 이는 Table 2의 BET식에 의한 비표면적의 증가와 HK식에 의한 미세 세공과 BJH식에 의한 중간 세공의 비표면적을 통해서도 확인할 수 있다. 각각 231.25 m<sup>2</sup>/g, 84.42 m<sup>2</sup>/g, 140.54 m<sup>2</sup>/g에서 288.28 m<sup>2</sup>/g, 136.95 m<sup>2</sup>/g, 154.47 m<sup>2</sup>/g으로 증가하였다. 그 중 활성화슬러지의 미세 세공이 더 크게 발달한 것을 확인할 수 있었다. 이는 조건은 다르지만 이전 수증기 활성화 연구<sup>5)</sup>에서도 확인된다. 또한 요오드 흡착능이 산세척한 탄화슬러지 176 mg/g보다 활성화슬러지 228.4 mg/g으로 더 큰 것파도 일치한다.

Table 2에서 수증기 활성화를 통해 미세 세공과 중간 세공 범위에서 각각의 평균 세공경은 11.27 Å, 37.78 Å에서 7.42 Å, 47.14 Å로 변화였다.

Fig. 4는 수증기 활성화를 통한 하수 슬러지 표면의 세공 발달을 SEM을 통해 비교한 것이다. 수증기 활성화를 통해 슬러지 표면의 세공 발달이 증가하였음을 확인 할 수 있다. 하지만 SEM은 표면의 세공 발달만을 확인할 수 있을 뿐 전반적인 세공 발달과 분포를 확인할 수 없다.



(a) Carbonized sludge(acid wash)



(b) Activated sludge

Fig. 4. Comparison of Pore development of carbonized sludge (acid wash) and activated sludge by SEM.

Table 2. Comparison of acid washed carbonized sludge and activated sludge for activation characteristics

	BET method (m <sup>2</sup> /g)	HK method (m <sup>2</sup> /g)	BJH method (m <sup>2</sup> /g)	Mean pore size(Å)	
				2~15	17~500
Carbonized sludge (acid wash)	231.25	84.42	140.52	11.27	37.78
Activated sludge	288.28	136.95	154.47	7.42	47.14

Fig. 5와 Table 3은 활성화슬러지의 화학적 성분 및 함량을 파악하기 위해 EDS로 분석한 것이다.

Table 3. Content of elements of activated sludge

Element	C	O	Mg	Si	S	K	Ca	Fe
Content(wt.%)	47.49	35.62	0.49	13.96	0.27	0.8	0.28	1.09

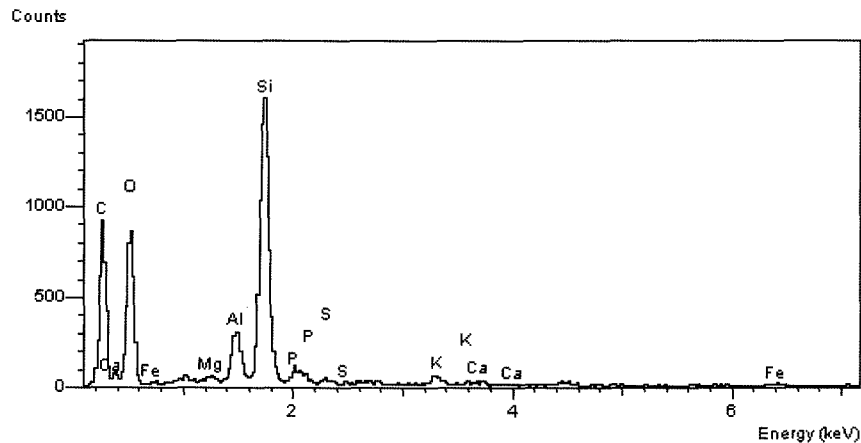


Fig. 5. Analysis of chemical component of activated sludge by EDS.

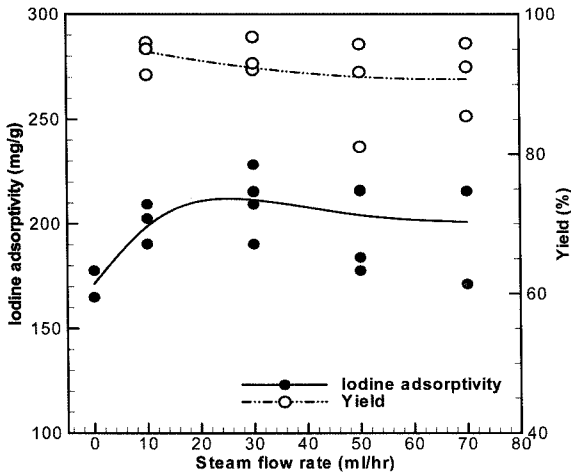


Fig. 6. Effect of variations of steam flow rate.

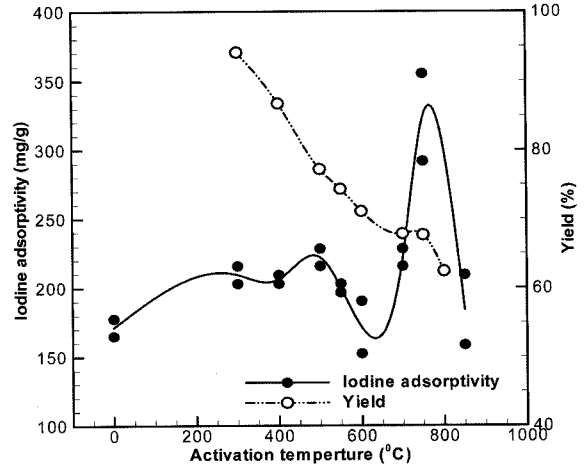


Fig. 7. Effect of variations of activation temperature.

### 3.3. 변수별 연구

#### 3.3.1. 수증기 주입량 변화

Fig. 6은 수증기 주입량에 대한 슬러지의 수증기 활성화특성을 파악한 것으로 수증기 주입량을 10~70 mL/hr로 변화시켜 실험을 수행하였다. 이때 활성화 온도는 500°C, 활성화 시간은 60분으로 하였다.

수증기 주입량에 따른 요오드 흡착능은 수증기 주입량이 30 mL/hr일 때 215.3 mg/g으로 최대값을 나타냈고, 이때의 수율은 92.1%이었다. 탄화물과 수증기의 반응은 탄소표면에 결합된 수증기가 분해되어 수소를 방출하고, 탄소표면에 산소는 머물러 탄소와 화합하여 일산화탄소를 생성하고 동시에 이탄해서 세공을 형성시킨다.

수증기 주입량이 30 mL/hr 이상일 경우 요오드 흡착능이 감소하는데 이는 수증기가 분해되어 생성된 수소가 탄소표면에 머무르면 탄소 소모를 방해하며, 과잉 수증기에 의해 증가한 산화성 가스가 오히려 세공을 손상시킨다.<sup>10)</sup> 수증기 주입량은 활성화시 수율에 거의 영향을 미치지 않는다.

#### 3.3.2. 활성화 온도 변화

Fig. 7은 활성화 온도를 300~850°C로 변화시켜 실험을 수행한 것으로 수증기 주입량은 Fig. 6의 수증기 주입량 변화에서 최적조건인 30 mL/hr로 고정하였고, 활성화 시간은 60분으로 하였다. 그 결과 활성화 온도 500°C에서 요오드 흡착능과 수율은 각각 228.4 mg/g, 77.23%로 나타났고 이를 활성화 온도의 최적조건으로 선정하였다. 활성화 온도 변수 실험에서 750°C에서 요오드 흡착능이 323.6 mg/g으로 최대로 나타났지만, 이 때 수율은 67.67%로 500°C보다 낮고 활성화 반응기를 750°C까지 승온시켜 온도를 유지하기 위해 소모되는 에너지 비용을 고려하여 최적 활성화 온도를 500°C로 선정하였다.

활성화 온도가 500°C보다 높은 경우 요오드 흡착능이 감소하는데 이는 2차 휘발분 방출을 위한 중간 생성물의 용해 작용에 의한 것이다. 또한 750°C 이상의 온도에서는 높은 활성화 온도에 의한 세공의 소멸과 수축에 의해 요오드 흡착

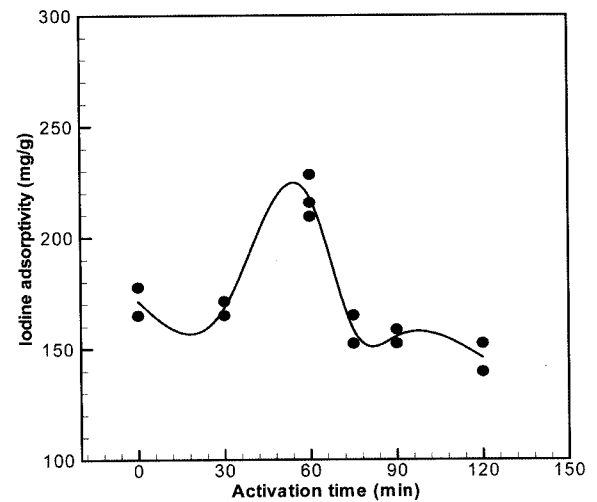


Fig. 8. Effect of variations of activation time.

능의 감소가 나타났다.<sup>11)</sup> 활성화시 활성화 온도에 대한 수율의 변화는 온도가 증가함에 따라 수율은 감소한다.

#### 3.3.3. 활성화 시간 변화

Fig. 8은 활성화 시간에 따른 슬러지의 흡착특성을 파악하고자 수행한 결과이다. 시간 변수로 30~120분으로 변화시키며 수행하였다. 이 때 Fig. 6, 7의 변수 실험에서 선정된 최적 조건인 수증기 주입량 30 mL/hr, 활성화 온도 500°C로 고정조건으로 하였다.

그 결과 60분에서 요오드 흡착능이 최대값으로 228.4 mg/g으로 나타났고, 이 때 수율은 77.23%로 나타났다. Fig. 6에서 보면 활성화 시간이 60분을 초과하면 요오드 흡착능이 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 열적 노출시간의 증가로 쿼(char)의 수축에 의해 세공이 감소되기 때문이다.<sup>12)</sup>

## 4. 결론

본 연구에서는 하수슬러지의 활성화시 수증기 주입량, 활성화 온도, 활성화 시간을 영향변수로 선정하여 반복실험을

통해 최적 활성화 조건을 선정하였으며 요오드 흡착능을 기준으로 하였다. 또한 질소 흡착 분석과 SEM으로 세공 발달, 비표면적 및 평균 세공경을 통해 흡착특성을 파악하고 EDX로 슬러지 내 화학적 성상 및 함량을 분석하였다. 그 결과는 다음과 같다.

수증기 활성화 변수별 연구에 의해 최적 활성화 조건은 수증기 주입량 30 mL/hr, 활성화 온도 500°C, 활성화 시간 60분으로 선정하였고 이 때 요오드 흡착능과 수율은 228.4 mg/g, 77.23%로 나타났다. 이는 유사한 연구를 한 장 등<sup>13)</sup>의 연구 결과로 확인된 최적 활성화 조건인 수증기 주입량 39 mL/hr, 활성화 온도 400°C, 활성화 시간 90분과 차이를 보였다. 또한 수증기 주입량, 활성화 온도, 활성화 시간의 조건에서 다른 경향성을 보였다. 비표면적은 산세척한 탄화슬러지 231.25 m<sup>2</sup>/g에 비해 활성화슬러지 288.28 m<sup>2</sup>/g로 증가하였다. 이는 SEM으로 활성화에 따른 슬러지 표면의 세공 발달 비교에서도 확인할 수 있다. 또한 질소 흡착등온선을 통해 수증기 활성화를 통한 세공 발달은 미세 세공에서 더 활발한 것으로 나타났다. 하지만 수증기 활성화는 일반적으로 750°C보다 높은 온도에서 진행되어진다는 것<sup>10)</sup>과 달리, 본 연구를 통해 하수슬러지를 재료로 수증기 활성화를 할 경우 최적 활성화 온도는 500°C에서 나타났으며 그 이상의 온도에서는 오히려 세공을 손상시킨다. 이는 활성화 온도에 따른 질소 흡착등온선의 분석으로 500°C 이상에서는 세공이 현저히 감소하는 것을 통해 확인되었다.

변수별 연구를 통한 하수슬러지의 수증기 활성화 특성을 파악한 결과이다.

1) 수증기 주입량이 30 mL/hr 일 때는 적절한 부분산화에 의해 세공이 형성되지만 그 이상에서는 탄소표면에 수소가 머물러 세공 형성을 방해하고 과잉 수증기에 따른 산화성 가스의 증가로 세공 구조를 손상시킨다.

2) 활성화 온도 500~750°C에서 2차 휘발분 방출을 위한 중간 생성물의 용해작용이 발생하고 750°C 이상에서는 높은 온도에 따른 세공의 소결 및 수축에 의해 요오드 흡착능이 감소한다.

3) 활성화 시간이 60분을 초과하면 열적 노출시간의 증가로 세공의 소결이 발생한다.

## 사 사

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었음.

## 참고 문헌

- Willson, G. B. and Dalmat, D., "Sewage sludge composting in the USA," *Biocycle*, **24**, 20~23(1983).
- Goldstein, N., "Biocycle survey sewage sludge composting as a medium amendment for chrysanthemum culture," *J. Am. Soc. Hort. Sci.*, **100**, 213~216(1985).
- Hu, W. F., "Synthesis of poly(3-hydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate) from activated sludge," *Biotechnol. Lett.*, **19**, 695~698(1997).
- Khalili, N. R., Campbell, M., Sandi, G., and Golas, J., "Production of micro- and mesoporous activated carbon from paper mill sludge: I. Effect of zinc chloride activation," *Carbon*, **38**, 1905~1915(2000).
- Rodriguez-Reinoso, F., Molina-Sabio, M., and Gonzalez, M., T., "The use of steam and CO<sub>2</sub> as activating agents in the preparation of activated carbons," *Carbon*, **33**(1), 15~23(1995).
- 국가표준종합정보센터, <http://www.standard.go.kr>, December (2003).
- Gregg, S. J. and Sing, K. S. W., Adsorption, surface area and porosity, 2nd Ed., Academic press(1982).
- Sing, K. S. W., "Reporting physisorption data for gas solid system with special reference to the determination of surface area and porosity," *Pure and Appl. Chem.*, **54**(11), 2201~2218(1982).
- Ahmadpour, A. and Do, D. D., "The preparation of active carbons from coal by chemical and physical activation," *Carbon*, **34**(4), 471~479(1996).
- 眞田雄三, 鈴木基之, 藤元, 신판활성탄: 基礎와 應用, 1판, 동화기술, 서울, pp. 72~78(1997).
- Lu, G. Q., Low, J. C. F., Liu, C. Y., and Lua, A. C., "Surface area development of sewage sludge during pyrolysis," *Fuel*, **74**(3), 344~348(1995).
- Guo, J. and Lua, A. C., "Characterization of chars pyrolyzed from oil palm stones for the preparation of activated carbons," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, **46**, 113~125(1998).
- 이영동, 강화영, "물리적활성화법과 약품활성화법을 이용하여 폐슬러지로부터 활성탄 제조," *한국폐기물학회지*, **17**(5), 562~574(2000).