

하수슬러지를 이용한 활성탄 개발에 관한 연구

이택룡, 정찬교,* 조영천[†]

수원대학교 환경공학과
445-743 경기도 화성시 봉담읍 와우리 산2-2

[†](주)일성엔지니어링
135-816 서울특별시 강남구 논현동 63-17

(2009년 2월 20일 접수; 2009년 3월 5일 수정본 접수; 2009년 3월 9일 채택)

A Study on the Development of Activated Carbons from Sewage Sludge

Taek-Ryong Lee, Chan-Kyo Chung,* and Young-Cheon Joe[†]

Department of Environmental Engineering, The University of Suwon
San 2-2 Wau-ri, Bongdam-cup, Hwaseong City, Gyeonggi 445-743, Korea

[†]Ilung Engineering co., LTD.
63-17 Nanhyeon-dong, Gangnam-gu, Seoul 135-816, Koera

(Received for review February 20, 2009; Revision received March 5, 2009; Accepted March 9, 2009)

요 약

본 연구는 하수슬러지 탄화물과 활성화제의 화학적 활성화반응을 이용한 활성탄 제조공정을 다루고 있다. 일반적으로 활성화제로는 알칼리 약품을 이용하는데 본 연구에서는 탄소와 활성화반응이 잘 이루어지는 KOH와 NaOH를 사용하였다. 실험결과, KOH로 제조된 활성탄이 NaOH로 제조된 활성탄보다 요오드 흡착력과 비표면적(BET) 등의 물성이 우수하였다. 하수슬러지 탄화물과 활성화제의 최적 침적비율은 KOH 75 wt%, NaOH 50 wt%임을 알 수 있었다. 5 M 염산용액으로 세척하여 중화시킨 후 증류수로 세정하는 활성탄 세정방법을 사용하였다. 본 연구의 최적 실험조건에서 하수슬러지 탄화물을 이용하여 제조된 활성탄의 경우 BET표면적 값이 약 600 m²/g에 이르렀다.

주제어 : 하수슬러지 탄화물, 활성화제, 활성탄

Abstract : This study deals with the production process of activated carbons from the sewage sludge char by chemical activation reaction. KOH and NaOH were used as activating agents, which react well with carbon. From the experiments, it was found that activated carbons made with KOH treatment had better physicochemical properties in terms of iodine number and BET value than those made with NaOH treatment. It was also found that the optimal deposition ratio of an activating agent to the sewage sludge char was 75 wt% of KOH and 50 wt% of NaOH. Activated carbons were washed out by distilled water after neutralization with 5 M hydrochloric acid solution. The activated carbons that were produced from a sewage sludge char at this optimal conditions have BET surface areas of approximately 600 m²/g.

Key Words : Sewage sludge char, Activating agent, Activated carbon

* To whom correspondence should be addressed.
E-mail: ckchu@suwon.ac.kr

1. 서론

1990년 환경처 출범 이후 4대강 상수원 수질개선을 위해 하수처리장을 확충하여 하수슬러지의 발생량은 점차 증가하였고, 2006년 말 기준 7,514 ton/day으로 발생하고 있으며, 이 중 약 71%가 해양 배출되어 처리되고 있다. 해양배출이 증가된 원인은 2003년부터 폐기물관리법에서 온실가스 발생억제 및 재활용 촉진을 위해 유기성 오니의 직매립이 금지됨에 따라, 해양배출이 다른 방식에 비해 처리비용이 상대적으로 저렴하고, 기술적으로 어려움이 없었기 때문이다. 그러나 이미 런던협약 '96의정서' 발효와 함께 하수슬러지를 포함한 폐기물의 해양배출 기준이 대폭 강화되었으며, 2011년 이후 하수슬러지의 해양배출을 금지하는 해양오염방지법이 제정되어 향후 하수슬러지 처리에 큰 어려움이 예상된다[1,2].

국내에서는 하수슬러지의 재활용 및 처리를 위하여 비료관리법, 폐기물관리법, 해양오염방지법 등으로 관리하고 있으며, 2006년 하수슬러지관리 기본계획과 2007년 하수슬러지관리 종합대책을 수립하여 2006년 말 기준 해양배출 71%, 재활용 15%, 소각 13%, 매립 1%에서 2011년 말까지 해양배출 0%, 재활용 57%, 소각 34%, 매립 9%의 목표로 하수슬러지 처리시설 완비를 추진하고 있다. 하수슬러지 종합대책 중 가장 큰 비중인 재활용(57%) 방법에는 복토재이용, 시멘트원료, 녹생토, 퇴비화, 탄화, 고형연료화 등이 있으나[2] 이를 고부가가치재로서의 재활용 방안이라 보기는 어렵다. Figure 1은 국내의 연간 활성탄 수입량을 보여주고 있다. 국내 활성탄은 현재 거의 수입에 의존하고 있으며, 선진국에 비해 기술력이 현저하게 떨어지고 있는 실정이다. 따라서 국내 활성탄 제조기술에 대한 독자적 기술의 확보는 매우 중요한 현안으로 떠오르고 있다.

본 연구는 최적조건의 저온열분해 공정을 통해 생성된 하수슬러지 탄화물을 고부가가치재인 활성탄으로 활용하기 위한 화학적 활성화 공정의 개발에 관한 내용이다.

본 연구를 통해, 하수슬러지를 이용하여 고부가가치의 활성탄을 제조할 수 있는 국내 기술을 확보하는 기반을 마련하는 동시에 하수슬러지 처리와 재활용에 있어 적정 대응방안을 모색할 수 있을 것이라 판단된다.

2. 실험방법

2.1. 하수슬러지의 최적 탄화조건 도출

활성탄의 재료가 되는 하수슬러지 탄화물을 제조하는 과정에서 실험온도와 등온유지 시간에 따른 변수를 고려하여 최적 탄화조건을 알아보았다. 우선, 500~900℃까지 100℃의 간격으로 실험온도를 설정하고 각 온도에 대한 등온유지 시간을 60분으로 고정하여 하수슬러지를 탄화시킨 후 각각의 BET값과 요오드 흡착력을 비교하여 최적의 탄화온도를 확인하였다. 그리고 최적의 탄화온도에서 등온유지 시간을 변화시켜가며 하수슬러지를 탄화시킨 후, 동일한 방법으로 BET 값과 요오드 흡착력을 비교하여 하수슬러지의 최적 탄화조건을 도출하였다.

2.2. 활성화 실험장치 구성

본 연구의 활성화 실험에 사용된 장치의 개략도를 Figure 2에 나타내었다. 본 연구에서는 정확한 실험온도의 제어를 위해 전기로를 사용하였다. 전기로는 최고 1,500℃까지 승온이 가능하며 발열체는 SiC로 구성되어 있다. 그리고 온도의 설정은 PID controller에 의해서 설정온도의 ±5℃ 이내로 조절이 가능하다.

본 전기로는 반응기의 길이가 100 mm이고, 내경이 45 mm, 외경이 50 mm인 알루미늄 반응관을 사용하였다. 반응기 내의 반응온도는 K-type 열전대에 연결된 온도측정장치를 사용하여 측정하였다. 하수슬러지 탄화물의 화학적 활성화공정에서는 반응기 내부에서 화학적 활성화반응 후 발생하는 gas와 금속원소(Na, K)를 급속히 반응기 외부로 배출시켜 활성화제와 하수슬러지 탄화물의 연속적 화학적 활성화반응을 유도해야 한다[3]. 따

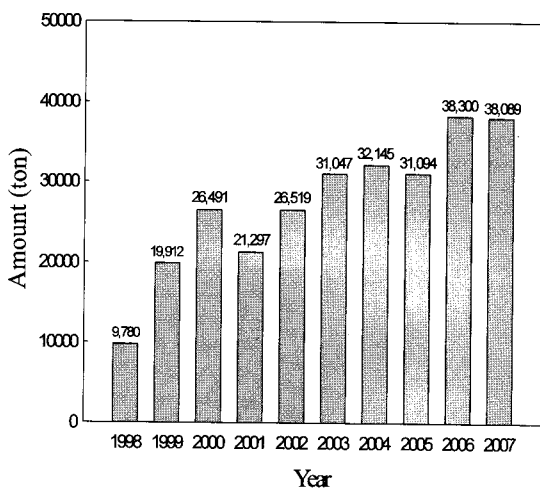


Figure 1. The amount of activated carbon imported in Korea[8].

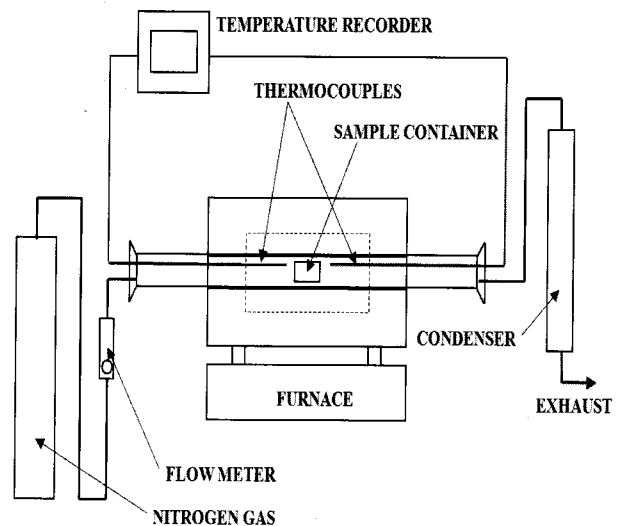


Figure 2. Schematic diagram of activation apparatus.

라서 활성화제와 탄소의 활성화반응에 전혀 영향을 미치지 않는 질소가스를 선택하였다[4]. 탄화과정 중 반응기 내에 잔존하는 산소 및 외부로부터 유입되는 산소에 의한 시료의 부분산화 및 연소를 방지하기 위해서는 50 ml/min의 질소가스의 주입으로도 충분하나, 연속적인 활성화반응을 유도하기 위해 2배 높은 100 ml/min의 유속으로 질소가스를 반응기 내부에 정량 공급하였다.

2.3. 활성화 실험방법의 선정

2.3.1. 화학적 활성화법

화학적 활성화는 물리적 활성화와 다르게 활성탄으로 제조할 원료 및 탄화물에 화학약품인 활성화제를 침적시켜 가열하며, 약품의 탈수 및 산화반응에 의하여 미세한 세공을 갖는 다공성의 활성탄을 제조하는 방법이다[5]. 화학적 활성화법에 이용되는 활성화제의 종류로는 KOH, Na₂CO₃, K₂CO₃, NaOH, ZnCl₂, AlCl₃, MgCl₂, H₃PO₄ 등이 있으며 대부분 알칼리 또는 알칼리성의 약품이며 약간의 산성용액도 있다[5].

화학적 활성화법에 있어서 활성화의 주 메커니즘은 활성화제를 이용한 탈수와 산화, 그리고 침식현상이다. 즉, 탄소질 원료가 활성화제에 의해 탄소를 소비하여 다공성 탄소질을 형성하는 것이다. 알칼리 금속화합물에 의한 약품활성화에서는 500°C 이상의 소성온도에서 탄소질을 강력히 침식하고 복잡하게 발달된 다공성 구조의 탄화물을 생성한다[6]. 화학적 활성화공정에서 가장 중요한 척도가 되는 것은 활성화제와 char를 혼합하는 침적 비율이라 할 수 있으며 침적비율에 따라 활성화 공정 후 생성되는 활성탄의 비표면적과 세공의 크기분포가 달라진다. 또한 화학적 활성화반응시의 활성화온도가 매우 중요한 요인으로 세공 구조의 형성 및 흡착성능에도 영향을 줄 수 있다[6].

본 연구에서는 최적의 탄화조건에서 얻은 하수슬러지 탄화물을 침적약품에 의한 화학적 활성화법을 이용하여 활성탄을 제조하였으며, 활성화제는 KOH와 NaOH를 사용하였다. 특히 본 연구에서 사용한 활성화제인 KOH는 높은 비표면적을 얻을 수 있는 활성화제로서 각광을 받고 있으며 그에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다. 화학적 실험을 위해 하수슬러지 탄화물에 대한 활성화제의 침적비율을 중량비로 환산하였다.

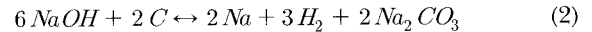
$$\text{Mixing ratio}(wt\%) = \frac{\text{Activating agent}(g)}{\text{Char}(g)} \times 100 \quad (1)$$

입자크기를 1 mm 미만으로 제어한 2 g의 하수슬러지 탄화물을 활성화제 2 g을 미온의 증류수 10 ml에 녹인 용액에 함침하여 60°C에서 1시간 동안 교반하였으며 이를 침적비율 100 wt%로 하였다. 각각의 침적비율(25~200 wt%)로 1시간 동안 교반을 완료한 시료를 건조기에 넣고 105±5°C로 12시간 건조하여 수분을 제거하였으며, 이를 전기로를 이용하여 정해진 활성화온도에서 반응시켰다.

2.3.2. 활성화온도의 선정

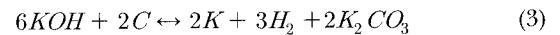
화학적 활성화공정에 있어 활성화온도는 매우 중요한 요인으로

세공구조의 형성 및 흡착성능에 영향을 줄 수 있다. NaOH와 C의 반응에 있어 가장 활성화 조건에 유리한 반응식은 다음과 같다.



위 Eq 2에서 Gibbs free energy 변화량(ΔG) 값은 730°C 이상에서 음의 값($\Delta G < 0$)을 가지므로 730°C를 반응온도로 설정하였다[7].

KOH와 C의 반응에 있어 가장 활성화 조건에 유리한 반응식은 다음과 같다.



위 Eq 3에서 Gibbs free energy 변화량은 630°C 이상에서 음의 값을 가진다. 그러나 본 연구에서는 동일한 활성화 온도조건과 동일한 활성화제의 침적비율을 적용하여 KOH와 NaOH에 의한 화학적 활성화 성능을 비교해야 하므로 KOH를 이용한 화학적 활성화공정에서도 NaOH와 마찬가지로 730°C의 반응온도로 화학적 활성화 실험을 진행하였으며 반응시간은 60분으로 설정하였다[8].

2.3.3. 활성탄 세정방법

세정은 활성탄의 세공내부와 표면에 잔류하는 활성화제와 가스, 금속원소(Na, K)등을 제거하기 위한 공정이라 할 수 있다. 본 연구에서는 5 M 염산으로 세정하여 활성화제의 중화과정을 진행한 후 증류수로 5회 세척한 다음, 건조하여 활성탄을 생산하였다. 이와 같은 방법으로 활성탄을 각각 세정한 시료를 동일하게 105±5°C의 온도로 약 12시간 건조하여 각각의 성능을 비교하였다[8].

2.4. 활성탄의 성능평가 방법

2.4.1. 미세기공 및 표면적 측정

활성화공정을 통해 생산된 활성탄의 미세기공 및 비표면적 측정을 위해 기상흡착장치(volumetric adsorption analyzer)의 일종인 ASAP2010 (Micromeritics Co., U.S.A.)를 이용하여 N₂를 대상으로 미세기공 및 비표면적(BET)을 측정하였다. 분석에 앞서 시료를 파쇄하고 35 mesh의 testing sieve를 통과시켜 500 μm 미만으로 제어 후에 전처리과정이라 할 수 있는 탈기체 공정을 12시간에 걸쳐 2단계로 나누어 시행하였다. 우선 1단계로 150°C에서 시료의 표면과 세공에 잔류할 수 있는 수분을 제거하였으며, 2단계로 300°C에서 시료의 세공에 잔류할 수 있는 불순물과 휘발성 물질 등을 제거하였다.

2.4.2. 요오드 흡착력

활성화공정을 통해 생산된 활성탄의 요오드흡착력 또는 요오드가(iodine number)평가를 위해 활성탄의 흡착성능 평가방법인 한국공업규격(KS M 1802:2003) 시험법을 이용하였다.

본 분석방법은 시료에 요오드용액을 가하여 흡착시킨 후, 상층액을 분리하고 지시약으로 녹말 용액을 가하여 티오황산나트륨 용액으로 적정하여 잔류하고 있는 요오드 농도로부터 요오드

흡착량을 구하고, 흡착등온선을 그린 후, 그 흡착 등온선에서 요오드의 잔류농도가 2.5 g/1,000 ml일 때의 흡착량을 구하여 요오드 흡착성능으로 하였다.

2.4.3. SEM 영상

활성화제(KOH, NaOH)의 선택에 따른 활성탄의 세공발달 정도의 차이를 직접 확인하기 위해 SEM 사진을 이용하였다. 5M 염산으로 중화 후 증류수를 이용하여 세척을 완료한 활성탄을 가지고 SEM 사진을 촬영하였다. 전자현미경을 통해 완성된 활성탄을 이용하여 SEM으로 3,000배의 배율로 촬영하여 활성탄의 세공발달 여부를 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 최적화된 하수슬러지탄화물 제조를 위한 저온열분해 실험 결과

Figure 3과 같이 500~900℃까지 100℃의 간격으로 실험온

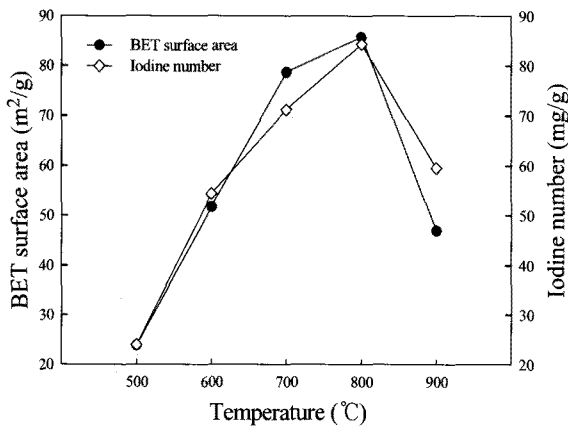


Figure 3. The BET surface area and the iodine number of activated carbons prepared by pyrolysis of sewage sludge for 60 min.

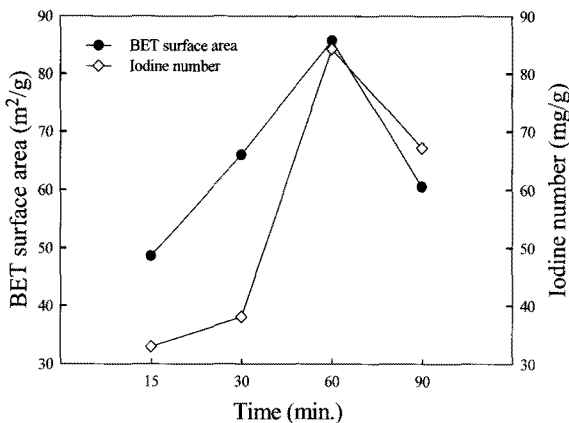


Figure 4. The BET surface area and the iodine number of activated carbons prepared by pyrolysis of sewage sludge at 800°C.

도를 설정하고 각 온도에 대한 등온유지 시간을 60분으로 고정하여 하수슬러지를 탄화시킨 후 BET 값과 요오드 흡착력을 비교하였다. 실험 결과 800℃의 온도에서 가장 우수한 탄화물이 생성되는 것을 알 수 있었다.

온도를 최적 탄화온도인 800℃로 고정된 뒤 등온유지 시간을 각각 15분, 30분, 60분 그리고 90분으로 설정하여 탄화시킨 후, BET 값과 요오드 흡착력을 분석하여 하수슬러지의 최적 탄화조건을 확인하였다. Figure 4와 같이 하수슬러지 최적 탄화시간은 800℃에서 60분으로 확인되었으며, 이 최적 탄화조건에서의 BET 값과 요오드 흡착력은 각각 85.76 m²/g과 84.29 mg/g로 나타났다.

3.2. 활성화제의 침적비율에 따른 활성탄의 비표면적 비교

본 연구에서는 탄소와 활성화제(KOH, NaOH)가 가장 유리한 활성화반응을 보이는 반응식에서 Gibbs free energy 변화량 (ΔG) 값이 공통적으로 음의 값($\Delta G < 0$)을 가지기 시작하는 730℃를 활성화 온도로 선택하였으며 반응시간은 60분으로 설정하였다. 800℃에서 60분 저온열분해 조건으로 생산된 최적화된 하수슬러지 탄화물을 화학적 활성화공정의 중간 재료로 사용하였으며, 탄화물 대 KOH의 침적비율을 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175 및 200 wt%로 실험하였으며, NaOH의 경우 100 wt% 이상의 침적비율 적용시 세공 발달이 전혀 이루어 지지 않는 관계로 침적비율을 25, 50, 75, 100 wt%로 설정하여 실험하였다. 활성화제(KOH, NaOH)의 침적비율에 따라 활성화공정을 마친 하수슬러지 탄화물을 우선 5M 염산으로 세정하여 활성화제의 중화과정을 진행한 후 증류수로 5회 세척하고 건조하여 활성탄을 제조하였다.

위와 같이 탄화물에 대한 활성화제(KOH, NaOH)의 침적비율에 따라 최종 생산된 활성탄을 대상으로 각각의 비표면적(BET)을 평가해 보았다. Figure 5와 Figure 6을 통해 실험결과를 살펴보면 KOH 침적비율이 100 wt%일 때 가장 우수한 BET 값을 나타내었으며, NaOH 침적비율은 50 wt%일 때 BET 값이 가장 높게 나타났다. KOH 침적비율을 125 wt%로 증가시키거나 NaOH 침적비율을 75%로 증가시킬 경우 활성탄의 BET 값

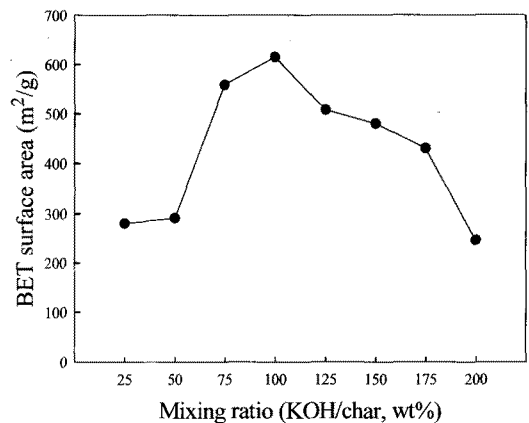


Figure 5. The BET surface area of activated carbon versus KOH/char mixing ratio.

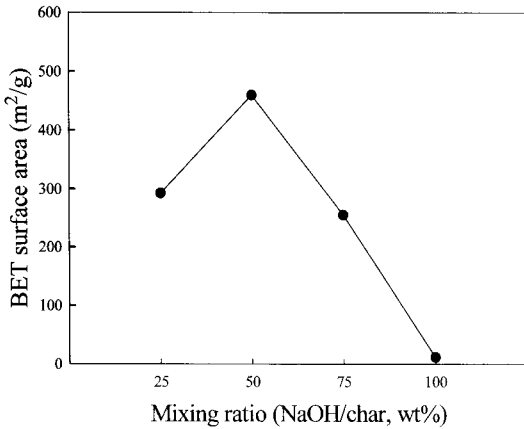


Figure 6. The BET surface area of activated carbon versus NaOH/char mixing ratio.

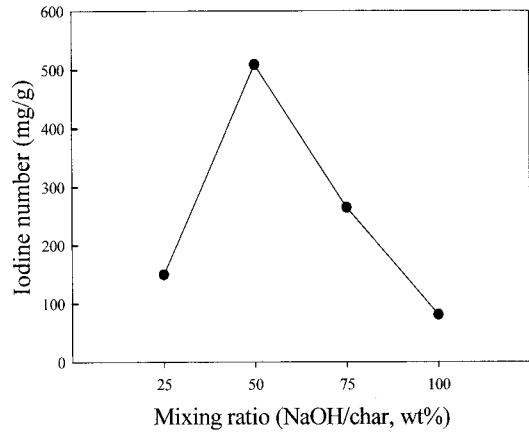


Figure 8. The iodine number of activated carbon versus NaOH/char mixing ratio.

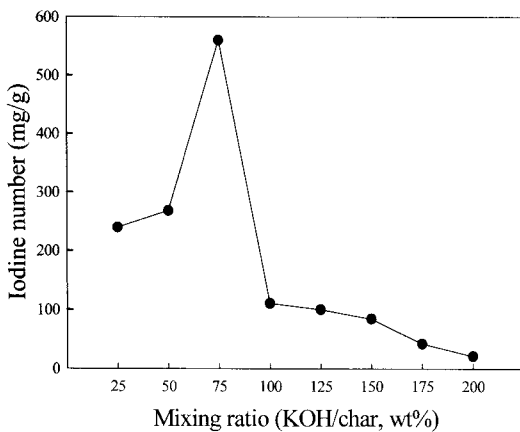


Figure 7. The iodine number of activated carbon versus KOH/char mixing ratio.

이 급격히 감소되는 경향을 나타냈는데, 이는 과량의 활성화제가 활성탄의 세공(pore)에 남아 있어서 BET 값을 낮추기 때문이다[8]. KOH 침적비율이 100 wt%일 때 BET 값이 615 m²/g, NaOH 침적비율이 50 wt%일 때 BET 값은 460 m²/g로 최고치에 다다랐다. 이를 통해 KOH와 반응한 활성탄이 NaOH와 반

응한 활성탄과 비교하여 우수한 BET 값을 나타냄을 확인할 수 있었다.

3.3. 활성화제의 침적비율에 따른 활성탄의 요오드 흡착력 비교

요오드 흡착력 실험은 앞서 진행한 비표면적 측정방법과 동일한 방법으로 활성화제(KOH, NaOH)의 침적비율에 따라 최적화된 가수슬리지 탄화물과 활성화반응을 진행한 후에 동일한 세정방법을 적용 후, 활성탄의 요오드 흡착성능을 비교하였다. 활성탄을 세정한 후 세정한 시료를 동일하게 105±5℃의 온도로 약 12시간 건조하여 각각의 요오드 흡착성능 측정 결과를 Figure 7과 Figure 8에 나타내었다. 실험결과로부터 KOH 침적비율이 75 wt%일 때 다른 실험조건에 비해 우수한 요오드 흡착성능을 나타내며, NaOH 침적비율이 50 wt%일 때 가장 우수한 요오드 흡착성능을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 KOH 침적비율을 100 wt%로 증가시킨 경우와 NaOH 침적비율을 75 wt%로 증가시킨 경우에는 요오드 흡착성능이 하락하는 것을 확인할 수 있었다.

3.4. 활성탄의 표면 이미지 비교

활성화제(KOH, NaOH)의 선택에 따른 활성탄의 세공 발달

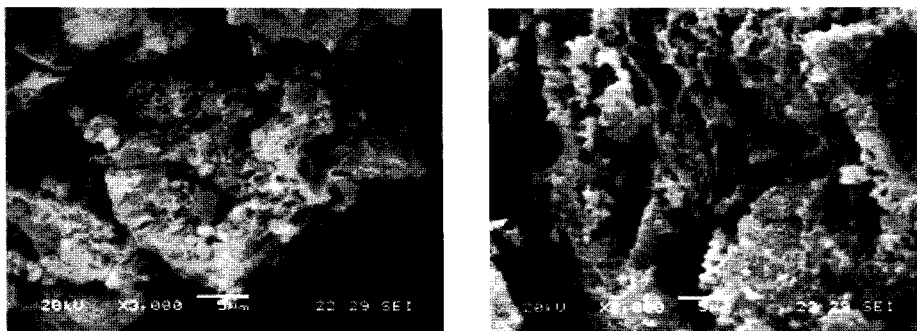


Figure 9. SEM micrographs of activated carbon made from sewage sludge (KOH/char mixing ratio = 75 wt%).

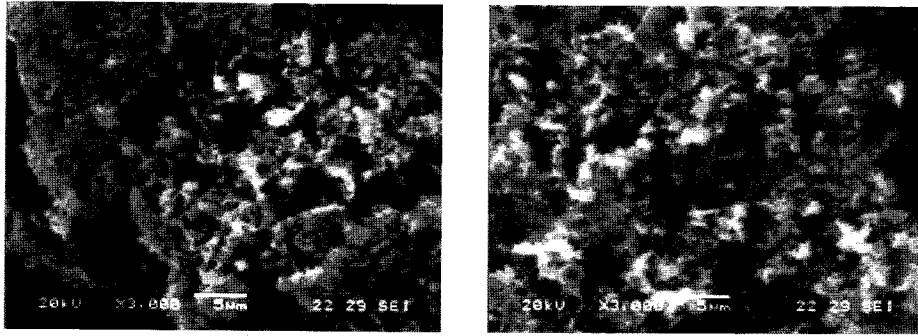


Figure 10. SEM micrographs of activated carbon made from sewage sludge (NaOH/char mixing ratio = 50 wt%).

Table 1. Optimal condition for the manufacture of activated carbons from sewage sludge

	Char at 800°C	KOH/char 75 wt%	NaOH/char 50 wt%
BET surface area (m ² /g)	85.8	559	460
Iodine number (mg/g)	84.3	560	509

정도의 차이를 직접 확인하기 위해 SEM을 사용하였다. 전처리가 완료된 활성탄의 세공을 확인하기 위해 SEM에서 3000배의 배율로 촬영하여 발달된 활성탄의 표면을 관찰하였다. KOH가 NaOH에 비해 하수슬러지 탄화물과의 반응성이 비교적 우수함을 Figure 9와 Figure 10의 SEM 사진을 통해 확인할 수 있다. NaOH와 반응한 활성탄 표면 내부가 깨끗하지 못한 것은 활성탄 표면의 깨짐 현상과 더불어 세정과정 후 활성탄 내 활성화제의 잔류 때문이라 판단된다[8].

3.4. 하수슬러지 활성탄 제조를 위한 최적조건

화학적 활성화 공정의 재료가 되는 하수슬러지 탄화물의 제조 조건과 하수슬러지 활성탄 제조를 위한 활성화제(KOH, NaOH)와 하수슬러지 탄화물의 최적 침적비율 그리고 각각의 성능을 Table 1에 나타내었다.

4. 결 론

하수슬러지 탄화물과 활성탄제의 화학적 반응을 이용한 활성탄 제조공정 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 탄소와 활성화제(KOH, NaOH)가 가장 유리한 활성화 반응을 보이는 반응식에서 Gibbs free energy 변화량($\Delta G < 0$)을 가지기 시작하는 730°C를 최저 활성화온도로 선택하여 하수슬러지 탄화물과 각각 60분간 반응시킨 결과, KOH 침적비율이 75 wt%, NaOH 침적비율이 50 wt%일 때 다른 실험조건에 비해 우수한 성능을 나타내는 것을 확인하였다.
- (2) 화학적 활성화공정에서 최적조건으로 제조된 하수슬러지 활성탄의 BET값과 요오드 흡착량은 일반적인 활성탄(BET

surface area: 500~1,700 m²/g, 요오드 흡착력: 900~1,100 mg/g)에 작기 때문에 이를 상용화하기에는 적합하지 않으며, 향후 활성화제와 탄소의 반응온도와 반응시간을 변화시켜가면서 Arrhenius 형태의 반응속도 정수를 구하여 산업화에 필요한 최적의 조업조건을 찾는 연구가 보완되어야 할 것이라 판단된다.

- (3) 화학적 활성화공정에서는 반응기 내부에서 화학적 활성화 반응 후 발생하는 가스와 금속원소(K, Na)를 급속히 반응기 외부로 배출시켜 활성화제와 하수슬러지 탄화물의 연속적 화학적 활성화반응을 유도해야 한다. 따라서 지속적인 활성화 반응의 유도를 위해 정량 공급되는 질소가스 유속의 변화가 활성탄의 물성치에 영향을 미칠 수 있을 것이라 판단되며, 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

감 사

본 연구는 수원대학교 환경청정기술연구센터 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Ministry of Environment, A Master Plan of Sewage Sludge Treatment, 2006-2007.
2. Ministry of Environment, Overall Measure of Making Waste Matter Energy, 2008.
3. Lozano-Castello, D., Lillo-Ródenas, M. A., Cazoria-Amorós, D., and Linares-Solano, A., "Preparation of Activated Carbons Spanish Anthracite I. Activation by KOH," *Carbon*, **39**, 741-749 (2001).
4. Kim, J.-M., Chung, C.-K., and Min, B.-H., "A Study on the Optimal Condition of Producing Charcoals to Develop Activated Carbons from a Discarded Timber," *J. Korean Inst. Resour. Recy.*, **17**(5), 66-75 (2008).
5. Tsai, W. T., Chang, C. Y., and Lee, S. L., "Preparation and characterization of activated carbons from corn cob," *Carbon*, **35**(8), 1198-2000 (1997).

6. Kim, H. H., Lee, J. M., and Kim, Y. J., "Preparation of Activated Carbons Pepper-seed by Chemical Activation," *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **11**(8), 883-889 (2000).
7. Lillo-Ródenas, M. A., Juan-Juan, J., Cazorla-Amorós, D., and Linares-Solano, A., "About Reaction Occurring during Chemical Activation with Hydroxides," *Carbon*, **42**(7), 1371-1375 (2004).
8. Kim, J.-M., Chung, C.-K., and Min, B.-H., "A Study on Development of Activated Carbons from Waste Timbers," *J. Korean Inst. Resour. Recy.*, **17**(6), 68-78 (2008).