

열분해 조건에 따른 슬러지 Char 특성 변화

차진선* · 박영권***,†

*서울시립대학교 환경공학부
**서울시립대학교 에너지환경시스템공학과
130-743 서울시 동대문구 전농동 90
(2011년 2월 1일 접수, 2011년 2월 21일 채택)

Effect of Reaction Conditions of Pyrolysis on the Characteristics of Sludge Char

Jin Sun Cha* and Young-Kwon Park***,†

*School of Environmental Engineering, 90 Jeonmong-dong, Dongdaemun-gu, Seoul 130-743, Korea
**Graduate School of Energy and Environmental System Engineering, 90 Jeonmong-dong, Dongdaemun-gu, Seoul 130-743, Korea
(Received 1 February 2011; accepted 21 February 2011)

요 약

본 연구에서는 하수슬러지의 열분해로 char를 제조하였고, 열분해 반응 조건이 슬러지 char의 특성에 미치는 영향을 조사하였다. 열분해 온도가 300 °C에서 800 °C로 증가함에 따라 슬러지 char의 비표면적은 증가하였으나, 700 °C에서는 일시적으로 감소하였다. 열분해 속도는 char의 비표면적과 기공부피에 미치는 영향이 크지 않은 것으로 나타났다. 반면, 열분해 반응시간이 증가함에 따라 비표면적과 기공부피는 증가하였으나, 평균 기공크기는 감소하는 결과를 나타내었다.

Abstract – In this study, char was produced via pyrolysis of sewage sludge and the effects of reaction conditions(temperature, heating rate, reaction time) on characteristics of char were investigated. As temperature increased from 300 °C to 800 °C, the surface area of sludge char increased in general but decreased at 700 °C temporarily. The effect of heating rate on specific surface area and pore volume of char was not large. Meanwhile, specific surface area and pore volume increased with reaction time but average pore diameter decreased.

Key words: Sludge Char, Pyrolysis, Reaction Conditions

1. 서 론

하수처리 과정에서 생성되는 하수슬러지는 2001년도 폐기물관리법 시행규칙 개정 전까지는 대부분 매립과 해양투기로 처리해 왔으나, 직매립이 금지된 이후 대부분 해양에 투기하여 처리하였다. 그러나 런던협약 '96 의정서 발효(제1기준: 2008년 2월, 제2기준: 2011년 2월부터 해양배출 금지)를 앞두고 하수슬러지 등의 폐기물 해양배출 규제가 대폭 강화됨에 따라 육상처리대책 마련이 시급하게 되었다. 대표적인 육상처리방법인 소각은 하수슬러지를 소각한 후 그 잔재물만을 매립 처분하기 때문에 매립 처리량의 부피를 80~90% 줄일 수 있다. 그러나 소각 배가스에는 다이옥신이나 황산화물, 질소산화물, 염화수소 등과 같은 2차 오염물질이 포함되어 있으며, 소각 잔재물에 중금속의 농도가 고농도로 존재하여 토양오염의 문제점이 있다. 이에 대한 대안으로 개발 중인 방법들에는 열분해, 가스화와 같은 열처리 공정이 있다. 열분해는 300~900 °C의 온도범위의 무산소 조건에서 유기물질을 열적으로 분해하는 공정을 말한다. 일

반적으로 열분해 공정은 슬러지 내 중금속 성분들이 탄화된 잔재물 내에 농축되어 소각 공정에 비해 오염물질이 적게 배출된다. 이러한 열분해 공정은 하수슬러지를 안정적으로 처리할 수 있을 뿐만 아니라 공정 중 발생하는 액상 또는 고상의 에너지를 사용할 수 있어 최근 많은 연구가 진행되고 있다. 열분해 과정에서 고형물로 발생하는 것을 char라고 하는데, 이들 물질은 폐자원 재활용, 저렴한 가격 등의 장점을 갖고 있어 토지개량제나 흡착제 및 고형연료 등으로 재이용하기 위한 연구들이 활발하게 진행되고 있다[1]. 하수슬러지 char의 재이용은 처리해야 할 슬러지 양의 감소뿐만 아니라 부산물의 재활용이란 측면에서 많은 관심을 받고 있다[2].

본 연구는 슬러지 char를 흡착제나 촉매로 재활용하기 위한 선행 연구로 열분해 온도, 열분해 속도, 열분해 반응 시간이 슬러지 char의 특성에 미치는 영향을 연구하였다.

2. 실험 방법

2-1. 대상시료

본 연구에서는 서울에 위치한 J 하수처리장에서 발생하는 슬러지를 대상시료로 이용하였다. 이 슬러지는 생활하수를 표준 활성 슬러지

†To whom correspondence should be addressed.
E-mail: catalica@uos.ac.kr

*이 논문은 KAIST 입선기 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

법으로 처리하는 과정에서 발생한 것이다. 함수율이 약 80%인 탈수 슬러지를 디스크 타입의 건조기를 이용하여 함수율이 10% 이하가 되도록 건조하였다.

2-2. 분석방법

2-2-1. 공업 분석(Proximate Analysis)

대상시료의 물리·화학적 특성을 알아보기 위하여 시료의 사성분(수분, 가연분, 회분, 고정탄소)을 분석하였다. 사성분 분석을 위해 ASTM D1102-84, ASTM E872, ASTM E897-82와 J. Guo 등[3]이 제시한 방법으로 적용하였다. 약 0.2 g의 시료를 질소 분위기의 TGA(Thermal Gravimetric Analyzer, Perkin Elmer-pyris 1)에서 상온부터 110 °C까지 승온시킨 후, 110 °C에서 1시간 유지시켜 수분함량을 계산하였으며, 900 °C까지 승온하여 가연분 함량을 계산하였다. 분위기 가스를 산소로 변경한 후, 온도를 800 °C로 낮추어 시료의 무게 변화가 없을 때까지 유지하였으며, 이 시간 동안에 나타난 무게 변화를 고정탄소로, 나머지를 회분으로 계산하였다.

2-2-2. 원소 분석(Ultimate Analysis)

시료의 원소분석은 원소분석기(Flash EA 1112 Series, CE Instruments/ThermoQuest Italia)를 사용하여 1,100 °C에서 C, H, N, S의 함량을 분석하였으며, 1,060 °C에서 환원조건으로 전환하여 O의 함량을 분석하였다.

2-2-3. 질소 흡·탈착

열분해 조건에 따라 생성된 char는 비표면적, 기공부피, 기공크기 분포 등을 알아보기 위하여 200 °C 진공분위기에서 전처리한 시료에 대해 77 K에서 질소 흡·탈착량을 측정하였다(BELSORP-MINI, BEL Japan Inc.). 이를 통해 등온 흡·탈착 곡선을 얻어 BET (Brunaure-Emmett-Teller)법으로 비표면적, 전체 기공부피(total pore volume), 평균 기공 크기(average pore size)를 계산하였다.

2-3. 하수슬러지의 열분해

열분해 조건이 char의 특성에 미치는 영향을 고찰하기 위해 열분해 온도, 열분해 속도, 반응 시간에 따라 슬러지를 열분해하였다.

열분해 온도는 300~800 °C까지 100 °C씩 승온하였으며, 열분해 시간에 따른 특성을 연구하기 위하여 해당 온도에서의 유지시간은 0.5, 1, 2, 3 hr로 하였다. 열분해 속도는 완속 열분해를 위해 5 °C/min, 10 °C/min으로 하였으며, 급속 열분해를 위해 반응기를 열분해 온도로 승온시킨 후 시료 투입하였다. Fig. 1에는 슬러지 열분해 장치

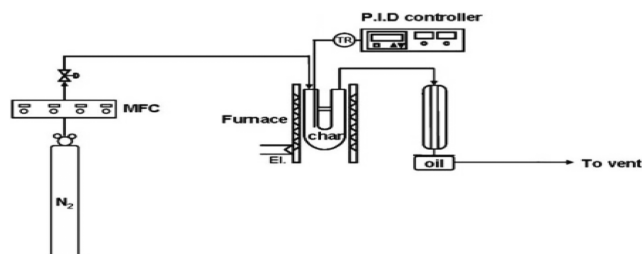


Fig. 1. Schematic diagram of sewage sludge pyrolysis apparatus.

Table 1. Nomenclature of sludge char and activated char

Samples	Initial	a	b
S-a-b	slow pyrolysis	heating rate	pyrolysis temperature
F-b	fast pyrolysis	-	pyrolysis temperature

의 모식도를 나타내었다. 본 연구에서 사용한 슬러지 char의 명명법은 Table 1을 따른다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 기초특성분석

3-1-1. 공업 분석(Proximate Analysis)

건조된 하수슬러지의 수분, 가연분, 고정탄소 및 회분 분석 결과를 Table 2에 나타내었다. 본 연구에서 사용한 하수슬러지의 수분 함량은 평균 5.2%인 것으로 나타났으며, 가연분은 평균 46.2%인 것으로 나타났다. 시료의 수분함량이 낮고 가연분 함량이 높을 경우 char를 생성하는데 필요한 에너지를 낮출 수 있으며 생성수율을 높일 수 있는 장점이 있다. 또한 고정탄소 함량이 높고, 회분의 함량이 낮을수록 고품질의 활성탄 제조가 가능한 것으로 보고되고 있다[3]. 그러나 Table 2에서 슬러지의 경우에는 타 바이오매스에 비해 가연분 함량은 낮고, 회분 함량은 높은 것으로 나타났다. 이는 하수처리 침사지에서 유입되는 토사 및 무기물에 의한 것으로 판단된다.

3-1-2. 원소 분석(Ultimate Analysis)

Table 3에는 건조된 하수슬러지의 원소분석 결과를 나타내었다. 분석 결과를 통해 하수슬러지는 아몬드 껍질(almond shell, N:0.2%), 호두껍질(walnut shell, N:0.3%), 아몬드 나무 전정(almond tree pruning, N:0.8%), 올리브 씨(olive stone, N:0.1%) 등의 타바이오매스에 비해 N의 함량이 다소 높은 것으로 나타났다.

3-2. 열분해 조건에 따른 char의 특성 분석

3-2-1. 열분해 온도에 따라 생성된 char의 특성 분석

하수슬러지의 열분해 온도가 char 특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 열분해 온도 300~800 °C에서 하수슬러지를 열분해 하였다. 완속 열분해를 위해서는 5 °C/min의 속도로 슬러지를 열분해하였으며, 급속 열분해를 위해서는 열분해 온도로 반응기 온도를 승온시킨 후 슬러지를 투입하였다.

Fig. 2에는 열분해 온도 및 승온속도에 따른 char의 생성율을 나타내었다. Char의 생성수율은 식 (1)에 나타낸 바와 같이 생성된 char의 양을 투입된 슬러지의 양으로 나누어 구하였다.

$$\text{Char 생성수율}(\%) = \frac{\text{생성된 Char의 양(g)}}{\text{투입한 sludge의 양(g)}} \quad (1)$$

Table 2. Proximate analysis results of dried sludge

	Moisture	Volatile matter	Fixed carbon	Ash
1	4.6	47.2	9.6	38.6
2	4.3	46.5	10.0	39.2
3	6.8	44.8	10.5	37.9
Mean.	5.2	46.2	10.0	38.6

Table 3. Ultimate analysis results of dried sludge

	C	H	O	N	S
1	40.2	6.1	47.2	5.5	1.0
2	40.0	6.1	46.8	5.6	1.6
3	39.1	6.1	48.5	5.3	1.0
Mean.	39.7	6.1	47.5	5.5	1.2

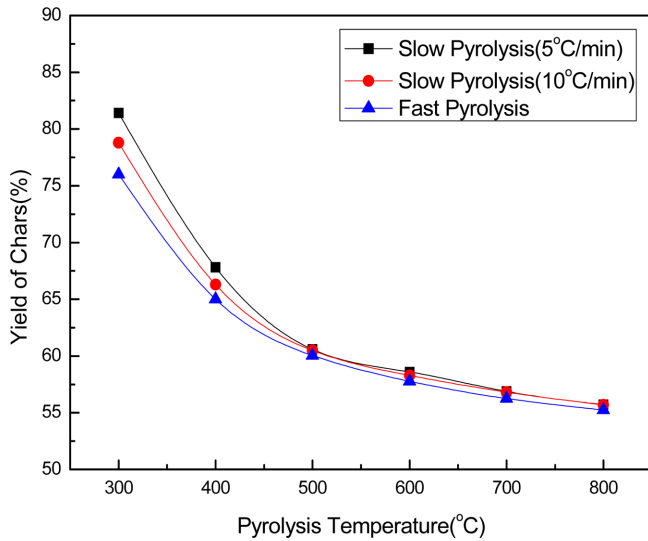


Fig. 2. Effect of pyrolysis temperature and heating rate on char yield.

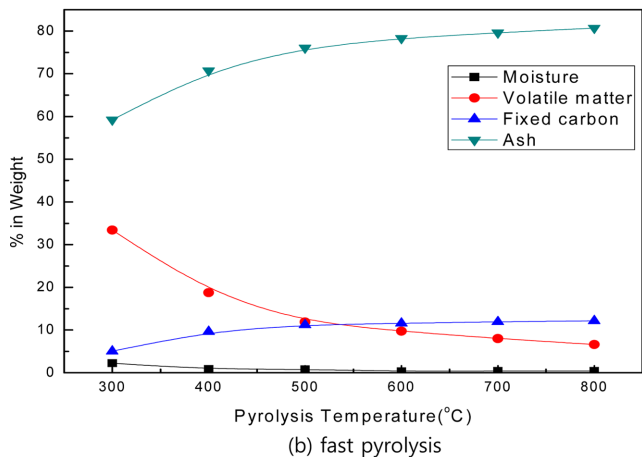
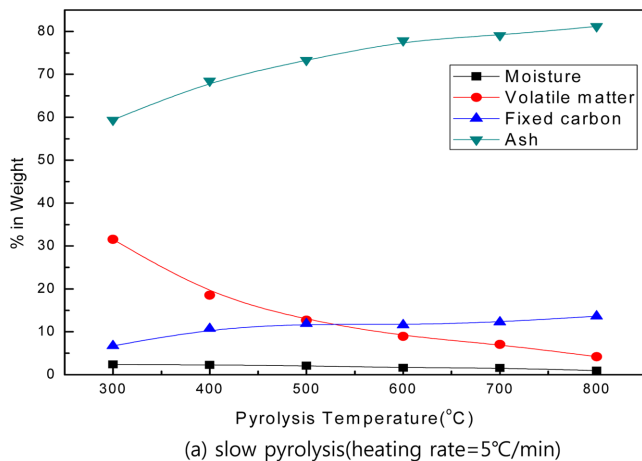


Fig. 3. Proximate analysis of the sludge char at different temperatures and heating rate.

그림을 통해 열분해 온도가 상승함에 따라 char의 생성수율이 감소함을 알 수 있다. 다른 바이오매스 열분해 실험에서도 같은 경향을 나타내는 것으로 보고되었는데[5,6,7], 이는 열분해 온도가 증가함에 따라 가연분의 탈휘발화(devolatilization)가 증가하기 때문이다[3].

Fig. 3(a)와 (b)는 완속 열분해(5 °C/min)와 급속 열분해 조건에서

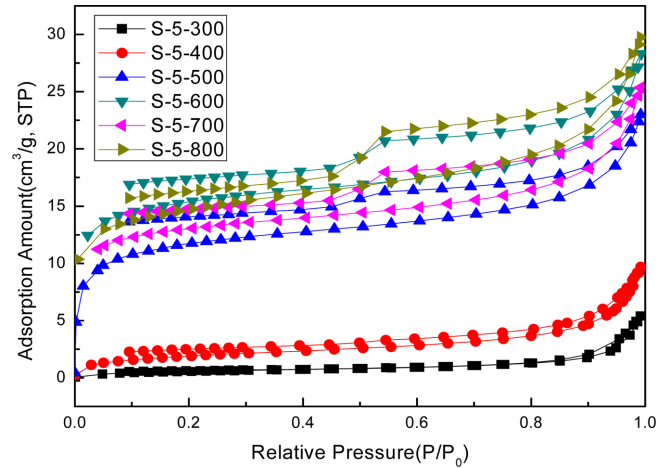


Fig. 4. Nitrogen isotherm of sludge char at different temperature (heating rate=5 °C/min).

열분해 온도에 따라 생성된 char의 사성분 분석 결과를 나타낸 것이다. 그림을 통해 열분해 온도가 증가함에 따라 가연분은 감소하는 반면, 고정탄소와 회분 함량은 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 J. Guo 등[3]의 실험결과와 유사한 경향을 나타낸 것으로, 온도가 증가함에 따라 가연분의 탈휘발화(devolatilization)가 증가하여 고정탄소나 회분으로 전환되기 때문이다.

Fig. 4에는 열분해 온도(열분해 속도: 5 °C/min)에 따라 생성된 슬러지 char의 질소 흡·탈착 곡선을 나타내었다. 그림을 통해 300, 400 °C에서 생성된 char의 흡·탈착 곡선은 압력이 증가하여도 흡착량에 큰 변화가 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다. 이는 미세기공이 막힌 비기공성(nonporous) 표면 특성을 가리키는 것이다. 그러나 500 °C 이상의 온도에서 생성된 char의 흡·탈착 곡선은 type I과 IV가 혼합된 형태를 나타내었다. 이는 생성된 char에 미세기공과 메조기공이 혼합되어 있음을 나타내며, hysteresis loop의 형성으로 기공이 잉크병 형태로 존재한다는 것을 알 수 있다[8].

Fig. 5의 기공크기분포 결과에서도 400 °C 이하의 온도에서 생성된 char에서는 메조기공 또는 기공이 거의 형성되지 않았으나, 500 °C 이상의 온도에서 생성된 char에서는 온도가 증가함에 따라 약 3 nm

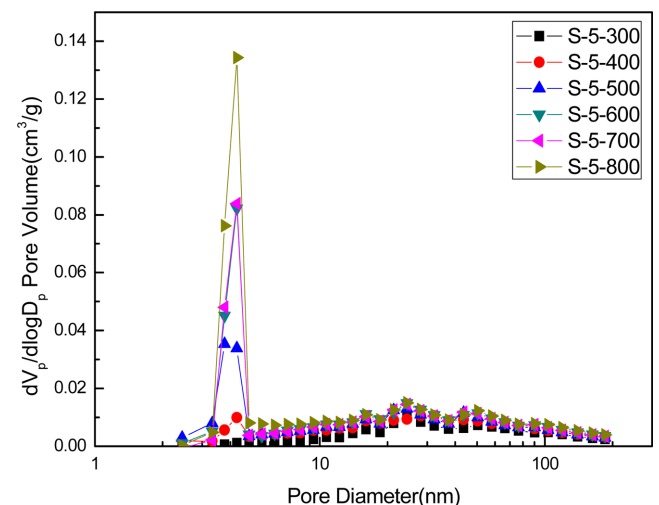


Fig. 5. Effect of pyrolysis temperature on pore size distribution of sludge char (heating rate=5 °C/min).

Table 4. Characteristics of sludge char with pyrolysis temperature (heating rate=5 °C/min)

Sample Name	Specific Surface area (m ² /g)	Total pore volume (cm ³ /g)	Ave. pore diameter (nm)
S-5-300	2	0.008	15.1
S-5-400	7	0.014	8.2
S-5-500	43	0.035	3.6
S-5-600	50	0.043	3.0
S-5-700	46	0.039	3.2
S-5-800	49	0.045	3.1

기공이 증가하는 특성을 나타내었다.

Table 4에는 열분해 온도에 따라 생성된 슬러지 char의 비표면적 및 기공 특성 분석 결과를 정리하여 나타내었으며, 표를 통해 300~600 °C 온도 범위에서는 열분해 온도가 증가함에 따라 비표면적이 증가하였으나, 700 °C에서 감소한 후, 800 °C에서 다시 증가하는 경향을 나타냄을 알 수 있다. 이러한 결과는 G.Q. Lu 등[5]의 슬러지 열분해 실험결과와 M. Ayllon 등[9]의 골분(bone meal) 실험에서도 나타난 것으로, G.Q. Lu 등의 실험에서는 600~700 °C 범위에서, M. Ayllon 등의 실험에서는 500~600 °C 범위에서 비표면적의 감소가 나타났다. 이에 대해 G.Q. Lu 등은 열분해 과정에서 생성된 중간 생성물(intermediate)의 용융(melting)에 의한 결과로 보고하였으며, M. Ayllon 등은 char의 용융에 의해 나타난 결과라고 보고하였다.

Table 4에서 열분해 온도가 증가함에 따라 기공부피가 증가하는 경향이 나타났으나, 비표면적이 감소하는 700 °C에서는 기공부피가 감소하는 것으로 나타났다. 이와 반대로 열분해 온도가 300 °C에서 600 °C로 증가함에 따라 평균 기공크기는 감소하였으며, 비표면적이 감소하는 700 °C에서 증가한 후, 800 °C에서 다시 감소하는 경향을 나타내었다. 이에 대해 W. Li 등[6]은 열분해 과정에서는 탈수(dehydration), 결합 절단 반응(linkage breaking off reaction), 잔류 탄소(residual carbon)의 구조 배열 공정(structural ordering process), 그리고 중합 반응(polymerization reaction)이 발생하는데, 온도가 증가함에 따라 중합 반응(polymerization reaction)이 활성화되어 시료의 직경이 감소하여 미세기공이 발달된다고 설명하였다. 이로 인해 비표면적, 평균기공 부피는 증가하고 평균 기공 크기는 감소한다고 보고하였다. 본 연구에서도 열분해 온도가 증가할수록 미세기공이 증가하다가 700 °C에서는 중간 생성물의 용융으로 미세 기공 등이 닫히는 것으로 판단된다.

또한 Table 4에서 열분해 온도가 600에서 700 °C로 증가함에 따라 생성된 슬러지 char의 비표면적이 감소하였다.

3-2-2. 열분해 속도에 따라 생성된 char의 특성 분석

하수슬러지의 열분해 속도가 char의 특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 승온속도를 완속(slow)과 급속(fast)으로 구분하여 슬러지를 열분해하였다. 급속 열분해 조건에서는 반응기의 온도를 500 °C까지 승온시킨 후 슬러지를 반응기에 투입하여 1시간 동안 열분해하였으며, 완속 열분해 조건에서는 500 °C까지 각각 5 °C/min, 10 °C/min의 속도로 승온시킨 후, 1시간 동안 슬러지를 열분해하였다.

앞 절의 Fig. 2에 나타난 바와 열분해 속도가 느릴수록 char의 생성수율이 높은 것으로 나타났다. 이는 여러 바이오매스의 열분해 실험결과와 일치하는 것으로, M. Inganzo 등[10], M. Ayllon 등[9]도

Table 5. Proximate analysis of the sludge char at different heating rate (pyrolysis temp.=500 °C)

(unit : wt%)				
Heating Rate	Moisture	Volatile Matter	Fixed Carbon	Ash
5 °C/min	2.1	12.7	11.9	73.3
10 °C/min	2.2	12.9	10.0	74.9
500 °C/min	1.5	15.0	8.2	75.3

열분해 속도에 따른 바이오매스 열분해 실험에서 열분해 속도가 증가함에 따라 char의 생성수율이 감소한다고 보고하였다. 이에 대해 A. Demircbas[11]는 바이오매스 열분해 시 저온영역에서는 점진적인 분해(gradual degradation & decomposition)에 의한 charring이 발생하는 반면, 고온영역에서는 빠른 휘발(volatilization)이 발생하기 때문이라고 설명하였다. 즉, 열분해 속도가 높은 경우에는 저온영역에서 char가 형성될 수 있는 반응 시간이 적어 char의 수율이 감소하게 되는 것이다.

Table 5는 500 °C에서 각각의 열분해 속도에 따라 생성된 char의 사성분 분석 결과를 나타낸 것이다. 열분해 속도가 증가할수록 char의 가연분과 ash의 함량은 증가한 반면, 고정탄소의 함량은 감소하는 것으로 나타났다. 이는 열분해 속도가 느린 경우, 열분해가 진행되는 시간이 길어져 슬러지 내의 가연분이 반응을 통하여 고정탄소나 회분으로 전환되었기 때문이다. 슬러지 열분해를 통해 생성된 char는 상용 활성탄(88% C, 0.5% H, 0.5% N and 3-4% ash)보다 탄소의 함량은 매우 낮은 반면, 회분의 함량은 매우 높은 것으로 나타났다. 이에 대해 X. chen 등[12]은 슬러지로부터 제조한 활성탄은 규소(Si)와 회분의 함량이 높은 비극성(less polar) 흡착제로 비극성 흡착물질(non-polar adsorbates)에 대한 친화도가 높은 독특한 특성을 가진다고 발표하였다.

Table 6를 통해 열분해 속도가 슬러지 char의 비표면적과 전체 기공부피에 미치는 영향을 고찰할 수 있다. O. Onay[13]은 잇꽃 씨(safflower seed)의 열분해 실험에서 열분해 속도가 증가함에 따라 비표면적과 전체 기공부피가 모두 증가한다고 보고하였으나, M. Inganzo 등[10]은 슬러지 열분해 실험에서 450, 650 °C에서는 열분해 속도가 증가함에 따라 슬러지 char의 비표면적이 감소하는 반면, 850 °C에서는 증가하며, 열분해 온도가 높을수록 열분해 속도에 의한 비표면적이 크게 나타난다고 보고하였다. 그러나 본 연구에서는 열분해 속도가 생성된 char의 비표면적과 전체 기공부피에 미치는 영향이 크지 않은 것으로 나타났다.

3-2-3. 열분해 반응시간에 따른 char의 특성 분석

열분해 반응시간이 char의 특성에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 반응 시간을 각각 0.5, 1, 2, 3 hr로 하여 char를 생성하였다. 이때 승온속도는 5 °C/min과 급속 열분해 조건(500 °C/min)으로 하였으며, 반응온도는 500 °C로 하였다. Fig. 6은 반응시간에 따른 char의 생성 수율을 나타낸 것이다. 반응시간이 0.5 hr에서 3 hr로 증가함에 따라 5 °C/min의 완속 열분해에서의 char 수율은 61.0%에서

Table 6. Characteristics of sludge char with pyrolysis heating rate (pyrolysis temp.=500 °C)

Sample Name	Specific Surface Area (m ² /g)	Total Pore Volume (cm ³ /g)	Ave. Pore Diameter (nm)
S-5-500	43	0.0349	3.635
S-10-500	44	0.0353	3.725
F-500	44	0.0380	3.906

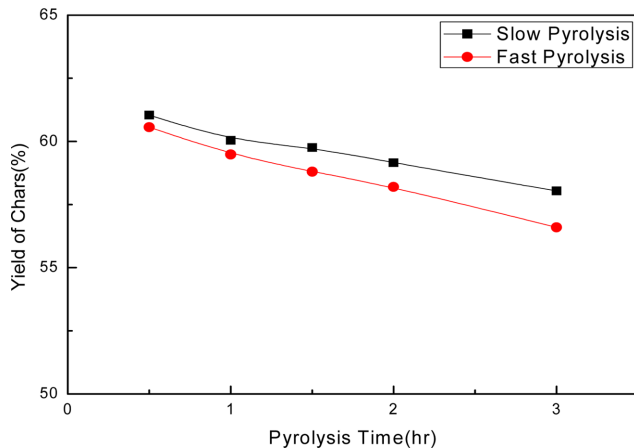


Fig. 6. Effect of pyrolysis time on char yield.

Table 7. Proximate analysis of the sludge char at different pyrolysis time (heating rate=5 °C/min, pyrolysis temp. =500 °C)
(unit : wt%)

Pyrolysis Time (hr)	Moisture	Volatile Matter	Fixed Carbon	Ash
0.5	2.5	13.3	11.0	73.2
1	1.5	12.4	11.8	74.3
2	1.5	10.8	12.3	75.4
3	1.4	9.9	12.9	75.8

58.0%로, fast pyrolysis에서는 60.6%에서 56.6%로 감소하였으나 큰 차이가 나타나지는 않았다. 이에 대해 J. Guo 등[3]은 팜 나무 씨앗(oil palm stone)을 10 °C/min의 승온속도로 400~900 °C 온도에서 열분해한 실험을 통해 반응 시간이 증가함에 따라 가연분이 휘발되어 char의 수율이 감소하지만 승온 과정에서 대부분의 가연분이 휘발되어 큰 차이를 나타내지 않는다고 보고하였다.

Table 7은 슬러지 열분해 반응 시간에 따라 생성된 char의 사성분 분석 결과를 나타낸 것이다. 반응 시간이 0.5 hr에서 3 hr로 증가함에 따라 가연분의 함량은 감소한 반면, 고정탄소와 회분의 함량은 증가하였으나 그 차이가 크지 않았다. 이는 반응 온도에 도달하기 전에 많은 양의 가연분이 휘발되어 고정탄소나 회분으로 전환되었기 때문이다.

Table 8에는 5 °C/min의 속도로 500 °C에서 반응 시간에 따라 생성된 슬러지 char의 특성을, Table 9에는 500 °C 급속 열분해 조건에서 반응 시간에 따라 생성된 슬러지 char의 특성을 정리하여 나타내었다. 이를 통해 열분해 반응 시간이 증가함에 따라 생성된 char의 비표면적이 증가하는 경향이 나타났으나, 반응 시간이 증가함에 따라 비표면적 증가폭은 점차 감소하였다. 전체 기공부피는 반응 시간이 증가함에 따라 증가하였으나, 평균 기공크기는 반응 시간이 증가함에 따라 기공크기가 감소하였다. 이는 Fig. 7의 기공 크기분포에 나타난 바와 같이 반응 시간이 증가함에 따라 약 3 nm 크기의

Table 8. Characteristics of sludge char with pyrolysis time for S-5-500 sample (pyrolysis temp.=500 °C)

Pyrolysis Time (hr)	Specific Surface area (m ² /g)	Total Pore Volume (cm ³ /g)	Ave. Pore Diameter (nm)
0.5	35	0.033	3.8
1.0	43	0.035	3.6
2.0	45	0.040	3.5
3.0	48	0.042	3.4

Table 9. Characteristics of sludge char with pyrolysis time for F-500 sample (pyrolysis temp.=500 °C)

Pyrolysis Time (hr)	Specific Surface area (m ² /g)	Total Pore Volume (cm ³ /g)	Ave. Pore Diameter (nm)
0.5	38	0.036	4.0
1.0	44	0.038	3.9
2.0	47	0.041	3.8
3.0	49	0.043	3.6

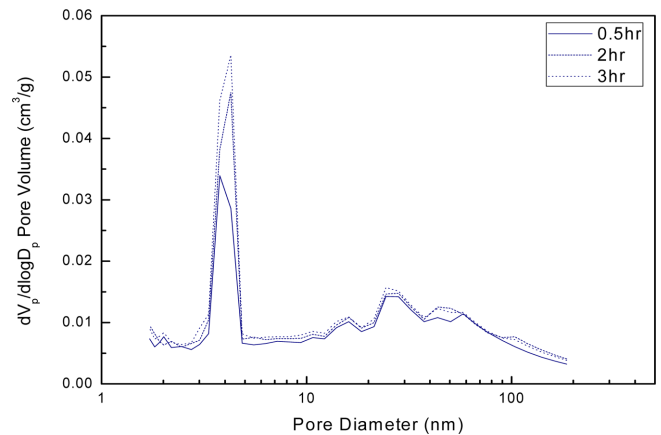


Fig. 7. Effect of reaction time on pore size distribution of sludge char (pyrolysis temp.=500 °C).

기공이 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 열분해 조건에 따른 char의 특성변화를 알아보기 위해 열분해 온도, 승온속도, 열분해 반응시간에 따라 생성된 char의 물리적 특성을 평가하였다. 열분해 온도가 300 °C에서 600 °C로 증가함에 따라 슬러지 char의 비표면적과 전체 기공부피가 증가하였으나, 700 °C에서 감소하였다가 800 °C에서 다시 증가하는 결과가 나타났다. 열분해 반응 시간이 증가함에 따라 비표면적과 기공부피는 증가하였으나, 평균 기공크기와 char의 생성수율은 감소하였다. 그러나 큰 차이가 나타나지는 않았다. 이상의 결과를 통해 슬러지 char의 비표면적 및 기공 특성에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 열분해 온도인 것으로 판단되었다.

열분해 과정에서 생성된 char는 고정탄소 함량이 높은 반면 회분의 함량은 낮으며, 비표면적과 기공부피가 클수록 활성화 매체와의 반응 후 고활성, 고비표면적의 특성을 갖게 된다. 본 연구의 실험결과와 열분해를 위한 시간 및 에너지 등을 고려할 때 슬러지 char를 활성화하여 흡착제나 촉매로 사용하기 위해서는 급속 열분해 조건으로 600 °C에서 열분해하는 것이 가장 적합한 것으로 판단된다.

참고문헌

- Ioannidou, O. and Zabaniotou, A., "Agricultural Residues as Precursors for Activated Carbon Production - A Review," *Renew Sustain Energy Rev*, **11**(9), 1966-2005(2007).
- López, G., Olazar, M., Artetxe, M., Amutio, M., Elordi, G. and Bilbao, J., "Steam Activation of Pyrolytic Tyre Char at Different Temperatures," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, **85**(1-2), 539-543(2009).

3. 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**(2), 113-125(1998).
4. Paris, O., Zollfrank, C. and Zickler, G. A., "Decomposition and Carbonisation of Wood Biopolymers-a Microstructural Study of Softwood Pyrolysis," *Carbon*, **43**(1), 53-66(2005).
5. 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).
6. Li, W., Yang, K., Peng, J., Zhang, L., Guo, S. and Xia, H., "Effects of Carbonization Temperature on Characteristics of Porosity in Coconut Shell Chars and Activated Carbons Derived from Carbonized Coconut Shell Chars," *Ind. Crop. Prod.*, **28**(2), 190-198 (2008).
7. Rio, S., Coq, L. L., Faur, C., Lecomte, D. and Cloirec, P. L., "Preparation of Adsorbents from Sewage Sludge by Steam Activation for Industrial Emission Treatment," *Process Saf. Environ. Protect.*, **84**(4), 258-264(2006).
8. Wu, F. C., Tseng, R. L. and Hu, C. C., "Comparisons of Pore Properties and Adsorption Performance of KOH-activated and Steam-activated Carbons," *Micropo. Mesopo. Mater.*, **80**(1-3), 95-106(2005).
9. Ayllon, M., Aznar, M., Sanchez, J. L., Gea, G. and Arauzo, J., "Influence of Temperature and Heating Rate on the Fixed Bed Pyrolysis of Meat and Bone Meal," *Chem. Eng. J.*, **121**(2-3), 85-96(2006).
10. Inguanzo, M., Dominguez, A., Menendez, J. A., Blanco, C. G. and J. J., "On the Pyrolysis of Sewage Sludge : the Influence of Pyrolysis Conditions on Solid, Liquid and Gas Fractions," *J. of Anal. Appl. Pyrolysis*, **63**(1), 209-222(2001).
11. Demirbas, A., "Effects of Temperature and Particle Size on Bio - Char Yield from Pyrolysis of Agricultural Residues," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, **72**(2), 243-248(2004).
12. Chen, X., Jeyaseelan, S. and Graham, N., "Physical and Chemical Properties Study of the Activated Carbon Made from Sewage Sludge," *Waste Manag.*, **22**(7), 755-760(2002).
13. Onay, O., "Influence of Pyrolysis Temperature and Heating Rate on the Production of Bio-oil and Char from Safflower Seed by Pyrolysis, Using a Well-swept Fixed-bed Reactor," *Fuel Process. Technol.*, **88**(5), 523-531(2007).