

유동층 반응기에서 하수슬러지의 건조 및 탄화 특성에 관한 연구

정영현 · 조기철 · 강동효* · 김이광** · 박창용*** · 오광중†

부산대학교 환경공학과 · *부산광역시 환경시설공단 · **낙동강유역환경청 · ***LRQA Korea Ltd.

(2006년 1월 3일 접수, 2006년 7월 25일 채택)

A Study on the Drying and Carbonization of Sewage Sludge in Fluidized Bed Reactor

Young-Hean Choung · Ki-Chul Cho · Dong-hyo Kang*

Yi-Kwang Kim** · Chang-woong Park*** · Kwang-Joong Oh†

Department of Environmental Engineering, Pusan National University

*Environmental Installation Corporation in Busan metropolitan city

Nakdong River Basin Environmental Office · *Lloyd's Register Quality Assurance Korea Ltd.

ABSTRACT : In this study, drying and carbonization experiment was conducted in a fluidized bed reactor according to the variations in gas velocity, particle size, and reactor temperature. As a result, the weight loss rates of sludge by drying in the fixed bed and fluidized bed type dryer showed that drying in the fluidized bed was about 6 times faster than drying in the fixed bed, and the weight loss rates of sludge by carbonization in the fixed bed and fluidized bed type reactor showed that carbonization in the fluidized bed was about 4 times faster than drying in the fixed bed. This implies that carbonization in the fluidized bed was completed within 10 minutes. Although the amount of char decreased with the increase of carbonization temperature, the amount of char became similar at upper 873K. Also, the amount of char decreased with increasing gas velocity. Consequently, it could be efficient that slow fluidization should be maintained within the range of fluidization in case of fluidized carbonization of sewage sludge at 873K.

Key Words : Sewage Sludge, Fluidized Bed, Char, Drying, Carbonization

요약 : 본 연구에서는 유동층 반응기에서 하수슬러지의 반응온도, 함수율, 입자크기, 가스유속에 따른 건조 및 탄화에 의한 열중량 변화를 관찰하였고 고정층 반응기에서의 결과와 비교하였다. 그 결과, 하수슬러지의 건조시 유동층을 이용한 건조는 고정층의 경우보다 약 6배 건조효율이 증가하였고, 탄화시 유동층을 이용한 경우가 고정층보다 약 4배 빠른 것으로 나타났으며, 슬러지는 약 10분 이내에 유동층 탄화가 완료되는 것으로 판단되었다. 또한, 탄화온도가 증가할수록 탄화물의 양은 감소되나, 873K 이상에서는 탄화물의 양이 유사하였으며, 유속이 증가함에 따라 잔류고형물이 감소하므로 하수슬러지는 873K 유동층 탄화시 유동화 유속범위내에서 저속 유동을 유지하는 것이 효율적인 것으로 판단되었다.

주제어 : 하수슬러지, 유동층, Char, 건조, 탄화

1. 서 론

2004년말 기준으로 하수처리장에서 발생하는 하수슬러지는 하루 6,646.8톤으로, 이중 77.1%가 해양투기로 처리되었고 그 다음 재활용(9.8%), 매립(1.4%), 소각(11.7%) 순으로 처리되어 왔다.

이러한 처리방법들 중 매립과 해양투기는 2003년 7월부터 시행된 폐기물 직매립 금지와 해양오염방지에 관한 런던협약에 의하여 어려워질 것으로 예측되어지므로 새로운 처리방법의 개발이 시급한 상황이다.

또한, 하수슬러지 소각은 90년대 초에 소규모 처리용량으로 출발했으며, 현재까지 유동상 및 회전상으로 소각방법이 연구되고 있다. 하수슬러지의 성상은 높은 수분함량과 낮은

유기물함량으로 인해 저위발열량이 낮아 초기에 설치된 소각시설의 경우 운전상에 많은 에너지를 요구하고, 연소과정에서 황과 질소를 함유한 하수슬러지로 인해 다량의 황산화물과 질소산화물을 배출하여 연도가스의 세정과 같은 고비용의 후처리설비가 필요하며, 매립시 재 속의 중금속의 용출 문제가 발생하므로 이에 대한 해결이 필수적이다.

따라서, 이러한 처리 방법들의 단점을 보완하여 소각 처리시 발생하는 2차 오염물 및 소각 잔사를 발생시키지 않으며, 폐기물 처리 시 필연적으로 발생하는 고상 잔재물을 재활용하여 사용할 수 있는 기술들이 일본, 유럽을 필두로 국내에서도 크게 대두되고 있으며, 일례로서 하수슬러지 탄화물의 용융에 의한 골재개발기술, 인회수 기술, 활성화에 의한 흡착제 개발기술 등이 있다.¹⁻⁴⁾

이러한 자원화 방법들 중 국내 하수슬러지의 다양한 성상 차이로 인한 특정 물질의 회수의 문제점, 소각재의 용융에

† Corresponding author

E-mail: kjoh@pusan.ac.kr

Tel: 051-510-2417

Fax: 051-583-0559

소요되는 과다한 전력비 등의 문제점으로 현재까지는 저온열 분해, 특히 함수율이 높은 하수슬러지에 적합한 유동층 열분해에 의한 탄화물을 이용하는 것이 적합할 것으로 판단된다.

따라서, 본 연구에서는 유동층 실험 장치를 이용하여 하수슬러지의 입경별, 함수율별, 유동화 가스유속별, 탄화온도별 증량변화를 측정하고, 고정층과의 비교를 통해 유동층 탄화공정의 운전을 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 이론적 고찰

하수슬러지는 헤미셀룰로오스, 셀룰로오스, 리그닌과 여러 불순물의 혼합물이므로 정확한 분자식을 표현하기는 어렵다.⁵⁾ 하지만 일반적인 유기물의 함유성분이 C, H, O, N, S를 함유하고 있으며 식의 단순화를 위해 모든 휘발성분들은 3성분 분석 결과에서 휘발분과 같으며, 수분의 증발도 휘발분 성분원소에 포함시키고, 생성되는 고형물인 char는 모두 순수 탄소로 구성된다는 전제하에 모든 휘발성분들은 아래와 같은 열분해반응에 의한 몰수지식을 세울 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & C_v C_v H_v O_v S_v N_v \\
 & \rightarrow v_s H_2 S + \frac{1}{2} v_n N_2 + \xi_{CO} v_o CO + \frac{1}{2} (1 - \xi_{CO}) v_o CO_2 \\
 & + [(1 - 2\xi_{C_2H_4} - 6\xi_{tar}) v_c - \frac{1}{2} (\xi_{CO} + 1) v_o] CH_4 \\
 & + [\frac{1}{2} v_h - 2(1 - \xi_{C_2H_4} - 4.5\xi_{tar}) v_c + (\xi_{CO} + 1) v_o - v_s] H_2 \\
 & + \xi_{C_2H_4} v_c C_2 H_4 + \xi_{tar} v_c C_6 H_6
 \end{aligned} \tag{1}$$

식 (1)에서 v_i 는 휘발분내의 성분 i ($i=C, H, O, S, N$)의 몰분율이다. 이 식에서는 다음을 가정한다. 첫째, 모든 질소는 N_2 로 배출되며 연료내의 질소성분의 60% 정도가 NH_3 로 전환된다는 van der Drift 등⁶⁾과 Kurkela⁷⁾의 연구결과에 의해 추가적으로 NH_3 는 탄화시 1차생성물로 발생될 수 있으나 미량 발생하므로 암모니아 생성은 무시한다. 둘째, 모든 황은 탄화반응에서 산소가 거의 없기 때문에 SO_2 보다는 H_2S 로 방출되기 때문에 모두 H_2S 로 방출된다고 가정한다. 셋째, 산소는 단지 CO로 방출되거나 CO와 CO_2 의 혼합물로 방출된다. 넷째, 휘발성분내의 나머지 탄소성분은 CH_4, C_2H_4 로 생성되고 그 외 타르성분(C_6H_6)으로 방출된다. 다섯째, 수소는 H_2S 에 의해 소모되고 탄화수소는 H_2 로 분해된다. 그러므로, 하수슬러지의 탄화로 인해 발생하는 수분을 포함한 휘발성분들은 $H_2S, N_2, CO, CH_4, H_2, CO_2, C_2H_4, C_6H_6$ 으로 방출되며, 휘발되지 않은 성분들은 모두 char가 되며 이는 순수탄소로 이루어진다고 한다.

그러나, 본 연구에 사용되는 장치 특성과 시료특성을 고려할 때 일반적인 가스화 반응인 char와 휘발된 가스와의 두 번째 반응은 발생하지 않으며, 생성물은 모두 순수탄소가 될 수 없다. 따라서, 잔류고형물의 성분은 다음과 같은 가정이 추가되어야 한다. 첫째, 발생한 가스는 모두 운반가스 N_2 에 의해 배출되어 잔류하는 char 성분과는 반응을 하지 않는다.

둘째, 생성된 char는 탄소성분 외에도 Cu, Pb, Zn, Mn, Fe, Cd 등의 중금속이 함유되어 있으나, Cd를 제외한 나머지 중금속들은 탄화동안 char에서 방출되지 않는다. 탄화 이후 상온 상태에서도 자연유출이 생슬러지와 소각재에 비해 미량 발생한다는 이전의 연구결과⁸⁾와 하수슬러지 내에 함유된 비점이 낮은 중금속인 Cd, Hg는 거의 없는 것으로 조사된 부산소재 J하수처리장의 탈수슬러지 중금속 분석결과(Hg: N.D., As: N.D., Cu: 0.054, Cd: N.D., Pb: N.D.)에 근거를 두어 중금속 유출은 무시되고 전량 char에 포함시킨다.

탄화 반응은 가열속도, 최종반응온도, 반응시간, 가스의 종류, 입자크기, 압력 및 촉매 등의 영향이 있다. 일반적으로 가열 속도와 최종반응온도가 커짐에 따라 탄화잔류물인 char 생성량은 감소하는 것으로 알려져 있으며,⁹⁾ 반응시간은 반응기 부피, 반응기 온도, 유입가스의 유량 등에 의해 변화시킬 수 있고,¹⁰⁾ 이러한 반응 조건과 시료의 형태는 2차적 반응의 우열에 중요한 역할을 한다.¹¹⁾ 이 외에도 압력과 촉매, 산소의 존재유무에 따라 열분해 반응이 달라지지만, 본 연구에서는 균일한 입경을 지닌 하수슬러지를 일정압력과 촉매 무사용, 그리고 완전 질소분위기 상태에서 탄화 반응을 수행하므로 가열속도, 최종반응온도, 반응시간에 따른 증량변화를 측정하였다.

3. 실험장치 및 방법

3.1. 실험장치

본 실험을 위한 건조 및 탄화장치는 Fig. 1과 같으며 전체 공정은 외부열원에서 heating coil을 통하여 열이 공급된다. 먼저 하수슬러지를 직경 3.8 cm, 높이 40 cm의 석영관으로 제작된 유동층 반응기내에 주입한 후 상온에서 유동상태를 확인한 후 건조실험의 경우 $378 \pm 5K$, 탄화실험의 경우 $673 \sim 973K$ 의 건조로(열전사, KANTAL 전기로)에 주입하여 일정시간 간격으로 유동되는 가스를 on/off 밸브를 이용하여 digital 저울로 시료의 증량을 측정한다. 장치를 반응기내로 주입하는 방법은 하부의 높이조절장치를 올려서 주입하며 이때 유동기체는 질소가스를 사용한다. 가스실린더를 빠져나온 유동 가스는 MFC(0~10 L/min, Brooks 5850E, Japan)에서 일정 유량으로 반응기로 공급되어 반응기 내의 distributor위의 하수슬러지를 유동시키며 열증량 변화는 측정범위가 $8,000 \pm 0.01$ g인 전자저울(Sartorius LA 8200S, Germany)을 사용하였으며, 프로그램에 의해 매 5초 간격으로 증량변화를 컴퓨터로 전송 후 기록되었다.

3.2. 실험방법

건조실험은 하수슬러지 입경별, 고정층과 유동층에서 증량 감소 실험을 수행하였으며 주입량은 층높이 3.8 cm($L/D=1$)로 고정하였고, 함수율은 이전 유동실험의 결과에 나타난 최대 유동화 가능한 함수율인 30 wt%를 적용하였다. 슬러지의 함수량은 슬러지를 완전 건조시킨 후 함수율에 해당하는 수분을 증량비로 계산하여 투입하였다.

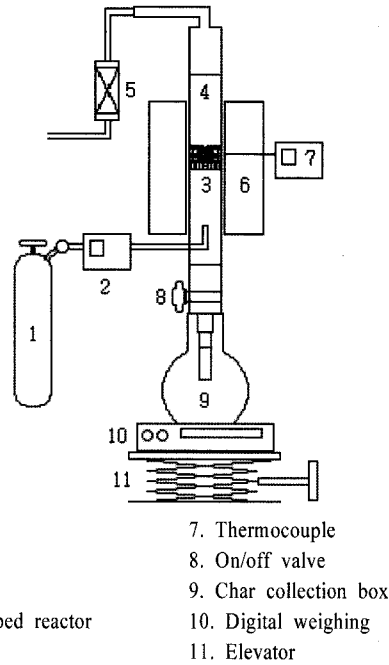


Fig. 1. Apparatus of the fluidized bed dryer.

탄화실험은 건조된 하수슬러지를 사용하였으며 입경은 앞선 슬러지 입경분포 결과에 근거를 둔 10/20, 20/40, 40/60 mesh를 선택하였다. 유동화 가스유속에 따른 탄화실험은 상온 예비실험에서 선택된 최소유동화 속도인 4.13 cm/sec(40/60 mesh 건조슬러지 적용)의 1, 2, 4배 증가시켜 적용하였으며, 온도에 따른 탄화실험은 탄화가 집중적으로 발생하는 영역인 773~973K 범위에서 100K 간격으로 수행하였다. 모든 실험에서 측정되는 전체 실험변수를 Table 1에 나타내었다.

본 실험에서 사용한 원시료는 부산시 J하수처리장에서 발생된 탈수슬러지를 사용하였으며 건조슬러지 입자크기는 건조슬러지를 Ball mill을 이용하여 일반적인 입자크기 측정에 사용되는 시간인 15 min 동안 분쇄 후 체분석 실험을 통해 측정되었으며 건조슬러지 평균입경은 334.254 μm이고 입경분포도에 의해 유동화에 부적합한 입자크기인 분말(100 mesh 미만)과 거대입자(20 mesh 이상)를 제외하면 대부분이 20/40 mesh와 40/60 mesh의 범위에 포함되었다. 따라서, 본 실험에서 선택된 시료의 입자크기는 20/40 mesh와 40/60 mesh를 선택하였다. 물질의 특성은 Table 2에 나타내었다.

Table 1. Experimental Variables and Conditions

Operating Variables		Operating Conditions
Drying	Moisture content(wt%)	30
	Bed types	Fixed bed, Fluidized bed
	SS particle diameter(mesh)	20/40, 40/60
Pyrolysis	SS particle diameter(mesh)	10/20, 20/40, 40/60
	Fluidizing gas velocity(cm/sec)	1Umf, 2Umf, 4Umf
	Carbonization temperature(K)	673, 773, 873, 973

Table 2. Physical properties of used dry sewage sludge in this study

Item		J sewage sludge	Sampled sewage sludge	
Proximate analysis (wt%)	Moisture	80.63	77.90	
	Incinerable	Volatile matter	10.72	9.79
		Fixed carbon ^a		
	Ash	8.65	12.31	
Elemental analysis (wt%)	C	21.7		
	H	3.19		
	O	19.73		
	N	3.82		
	S	1.16		
True density(g/cm ³) ^b		2.1828	2.1828	
Apparent density(g/cm ³) ^c		0.6503	0.6503	

^a Coal industrial testing method

^b True density, determined with He. (AccuPyc 1330 V1.00)

^c 40/60 mesh diameter

4. 실험결과 및 고찰

4.1. 유동층에서 입경별 건조중량 변화

Fig. 2는 유동층 반응기에서의 함수율 30%의 하수슬러지 입경별 건조시간에 따른 중량감소를 나타내었으며 입자크기는 건조에 의한 중량변화에 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다. Fig. 3은 고정층 및 유동층에서의 하수슬러지 중량감소를 나타낸 것으로, 유동층 건조는 고정층 건조와 같이 건조 완료까지 S자형 곡선을 나타내지만 전체 중량감소시간이 고정층 건조의 약 1/6로 감소함을 알 수 있었다. 건조초기에 나타나는 일정한 건조속도의 수평구간과 첫 번째 건조속도 감소구간의 경계지점까지의 수분함량이 자유수함량에 해당하고 첫 번째 건조속도 감소구간과 두 번째 건조속도 감소구간의 경계지점 사이의 수분이 간극수에 해당되며, 이후의 중량감소에 의한 함수율 20%에서 0%까지의 구간을 표면수와 부착수에 해당된다.¹²⁾ 이중 자유수와 간극수는 응집체의 첨가

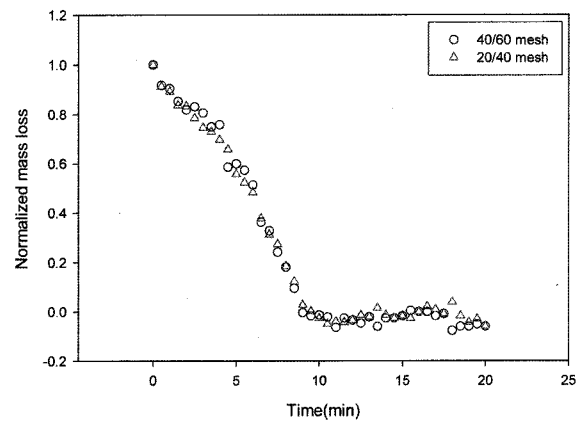


Fig. 2. Mass loss of sewage sludge with particle sizes at fluidized bed dryer(air flow rate = 6 L/min).

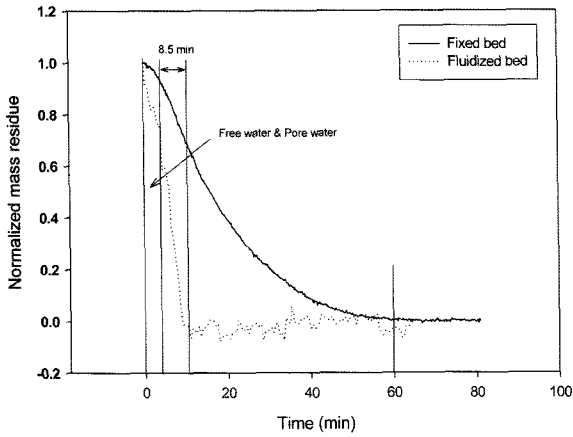


Fig. 3. Mass loss of sewage sludge at fluidized bed dryer.

등에 의해 제거될 수 있는 부분이므로 Fig. 3의 결과에서 알 수 있듯이, 동일한 물리적 특성을 지닌 하수슬러지의 경우 유동층에 의한 건조는 최소 8.5 min이 소요되므로 약 6배 이상 건조효율이 증가하는 것으로 나타났다.

4.2. 고정층과 유동층 건조속도

고정층과 유동층에서의 건조에 대한 각각의 건조속도상수를 도출하여 아래의 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. 기본적으로 건조속도식은 열적감량에 대한 지수법칙($n=1$ 가정)을 적용하여 산출하였으며 그 결과, 고정층에서의 건조속도상수는 0.057 min^{-1} , 유동층은 0.209 min^{-1} 으로 나타나 유동층의 경우가 약 3.646배 빠름을 알 수 있었다. 이는 유동층에서의 입자 열접촉면적이 고정층보다 더 크기 때문으로 판단된다.

Fig. 6에서는 고정층과 유동층에서의 건조에 대한 각각의 건조속도식을 적용하여 모사한 결과와 실험결과를 비교하였으며 상관도가 각각 0.9894와 0.9149로 나타났다. 이는 상기 건조속도상수값이 고정층 건조의 경우 1차 지수감소 모델이고, 유동층 건조의 경우 1차에서 벗어남을 알 수 있으나, 가장 간단한 모델을 선택하는 것이 효율적이므로 유동층 건조도 1차 모델로 선정하였다.

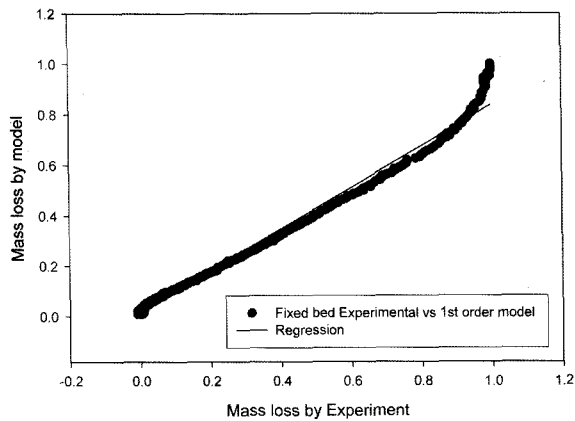


Fig. 4. Relationship between experimental and modelled results for fixed bed drying($Y=0.819X+0.0191$, $k=0.05742 \text{ min}^{-1}$).

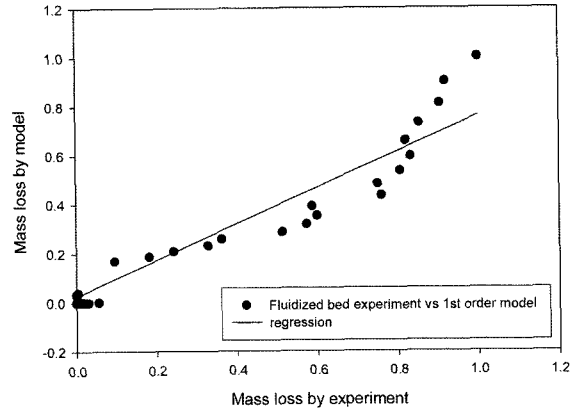


Fig. 5. Relationship between experimental and modelled results for fluidized bed drying($Y=0.7353X+0.0254$, $k=0.2094 \text{ min}^{-1}$).

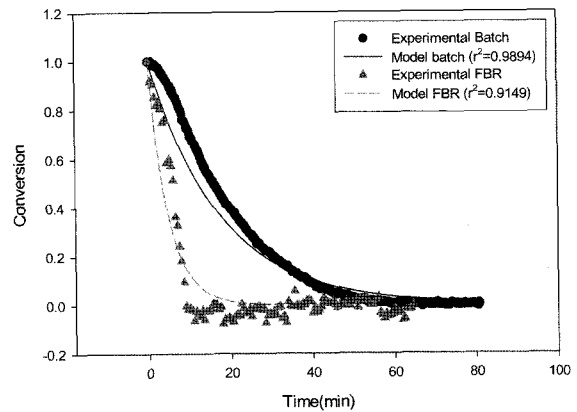


Fig. 6. Comparison between experimental and modelled results for fixed bed and fluidized bed drying.

4.3. 유동층에서 입경별 탄화에 따른 중량 변화

Fig. 7에 건조 하수슬러지 입경에 따른 유동층 열분해시 중량변화를 나타내었다. 중량측정방법은 매 5 sec 간격으로 반응기 전체의 중량을 컴퓨터로 자동 기록하였다. 결과에서 알 수 있듯이 중량변화는 40/60 mesh의 입자가 유동화 초기 4

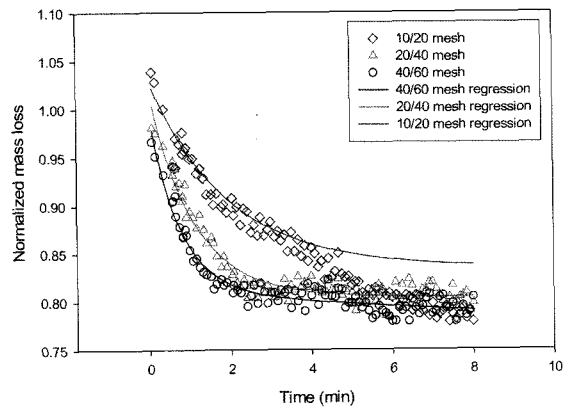


Fig. 7. Fluidized bed pyrolysis of dried sewage sludge with particle size distribution (Temperature : 873K, Gas velocity : 12.6 cm/sec).

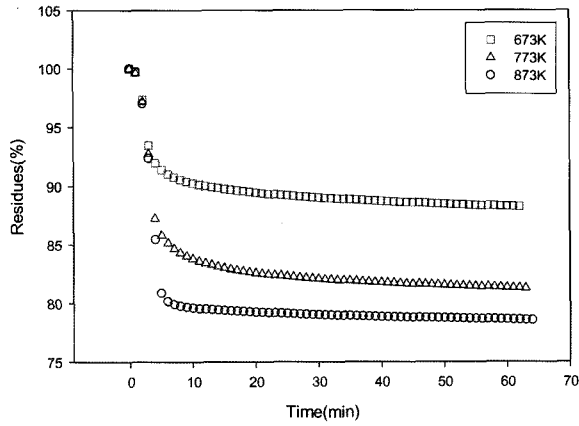


Fig. 8. Iso-pyrolysis of sewage sludge(40/60 mesh) in fixed bed reactor.

min, 20/40 mesh는 6 min, 10/20 mesh는 10 min 이내에 급격한 중량감소를 나타내었으며 입경이 클수록 중량감소곡선이 완만해 지는 것으로 나타났다. 이는 입자크기가 작을수록 입자 내부로의 열전달이 빠르기 때문으로 판단되었다.

Fig. 8은 각 온도에 따라 40/60 mesh 크기의 하수슬러지를 TGA 분석한 결과를 나타낸 것으로 탄화물의 중량은 초기 하수슬러지의 78%를 차지하였다. 이는 Fig. 7에서 나타난 탄화후 잔류고형물량인 초기 하수슬러지의 80%와 유사하였으므로 4 min 이내의 탄화가 타당할 것으로 판단되었으며, 이는 고정층 탄화와 비교하여 약 2.5배 빠른 것으로 나타났다. 또한, 입경이 클수록 유동화 시간은 증가하였으며 10/20 mesh 이하의 건조하수슬러지는 10 min 이내에 열분해가 완료되는 것으로 나타났다.

4.4. 유동층 온도별 탄화에 따른 중량 변화

Fig. 9는 유동층 온도에 따른 하수슬러지의 열중량 변화를 나타낸 것으로, 40/60 mesh 입경의 건조하수슬러지를 사용하였으며, 유동화 가스는 유량 10 L/min의 질소가스를 사용하였다. 유동층 열분해 장치의 온도가 673K에서 973K로 증가함에 따라 잔류고형물의 양도 80%에서 76%로 감소하였

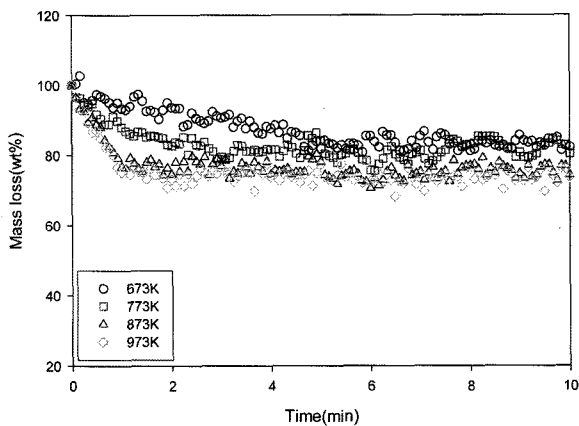


Fig. 9. Iso-pyrolysis of sewage sludge(40/60 mesh) in fluidized bed reactor.

으며, 초기 감소속도도 증가하며 열분해 완료시점이 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 873K와 973K의 경우 잔류량의 차이가 미미하므로 결론적으로 하수슬러지의 유동층 열분해에 적합한 온도는 873K로 판단되었다.

4.5. 유동화 가스유속별 탄화에 따른 중량 변화

Fig. 10은 유동화 가스 유속에 따른 중량변화를 나타낸 것으로 40/60 mesh 건조 하수슬러지의 최소유동화속도인 4.13 cm/sec의 1, 2, 4배로 질소가스유속을 변화시킨 결과이다. 반응기 특성상 측정 데이터가 일정하지 않은 것으로 나타났으나 전반적으로 유속의 증가에 따라 잔류고형물의 양도 증가함을 알 수 있었다. 이는 Fig. 11에 나타난 유속의 증가에 따른 반응기내부 온도변화 결과로 알 수 있듯이 반응기의 온도가 감소하기 때문인 것으로 판단되었으며 이러한 결과는 Fig. 8의 고정층에서의 열중량 변화 결과와도 일치하였다. 따라서, 유동화 영역 내에서 유속이 2배 증가함에 따라 잔류고형물의 양도 약 2.5% 증가하였으며, 열분해 완료시간은 거의 일정하였으므로 유동화 영역내에서 가능한 낮은 유속으로 유동화를 수행하는 것이 타당할 것으로 판단되었다.

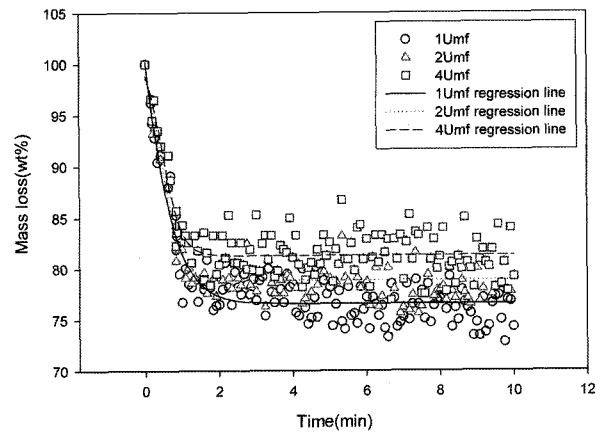


Fig. 10. Fluidized bed pyrolysis of sewage sludge(40/60 mesh) with gas velocities at 873K.

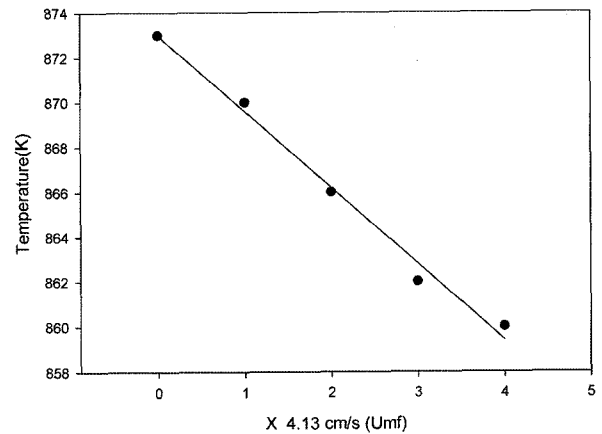


Fig. 11. Temperature profile of fluidized bed in accordance with gas velocities at the furnace temperature as 873K.

5. 결론

1) 하수슬러지의 고정층 건조는 일반 응집체에 의한 수분 제거가 어려운 70%의 잔류 수분량을 완전 제거하는데 소요 되는 시간이 최소 건조시간으로 나타나므로, 20/60 mesh 입경 범위에서는 건조시간이 50 min 이상이 타당할 것으로 판단된다. 또한, 입자크기가 증가할수록 초기 증량감소가 약간 증가하는 것으로 나타났으며 유동층 건조는 최소 8.5 min이 소요되므로 고정층 건조보다 약 6배 이상 건조효율이 증가 하였다.

2) 40/60 mesh 건조하수슬러지는 873K 열분해에 의해 초기 4 min 이내에 증량감소가 급격히 발생하여 잔류고형물이 약 20% 존재하였으며, 873K 등온 TGA 실험에서 최종 잔류물의 증량분율인 0.78과 유사하였으므로 4 min 이내의 열분해가 타당할 것으로 판단되었으며, 이는 고정층 열분해와 비교하여 약 2.5배 빠른 것으로 나타났다. 또한, 입경이 클수록 유동화 시간은 증가하였으며 10/20 mesh 이하의 건조하수슬러지는 10 min 이내에 열분해가 완료되는 것으로 판단되었다.

3) 온도별 유동층 열분해 결과 873K와 973K의 경우 잔류량의 차이가 미미하므로 결론적으로 하수슬러지의 유동층 열분해에 적합한 온도는 873K로 판단되었으며, 유속별 유동층 열분해 결과 유속의 2배 증가에 따라 잔류고형물의 양은 약 2.5% 증가하였으며, 열분해 완료시간은 거의 일정하였다.

사 사

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었습니다. 연구비를 지원해 주신 부산대학교에 감사드립니다.

기호설명

v_i	Mole ratio of i , [-]
ζ_i	Conversion ratio of i , [-]
k	Reaction rate constant, [1/min]
T	Temperature, [K]
t	Time [min]
U_{mf}	Minimum fluidization velocity [cm/sec]
v	Gas velocity, [cm/sec]
W	Normalized weight, [g/g]

참고문헌

1. Yun Y. S. and Lee G. B., "Recyclability analysis of slags obtained at gasification and incineration-melting conditions," *Energy Eng. J.*, **13**(1), 82~91(2004).
2. Takahashi, M., Kato, S., Sarai, E., Ichioka, T., Htayakawa, S., and Miyajiri, H., "Technology for recovering phosphorous from incinerated wastewater treatment sludge," *Chemosphere*, **44**, 23~29(2001).
3. Rozada, F., Calvo, L. F., Garcia, A. I., Villacorta, J. M., and Otero, M., "Dye adsorption by sewage sludge-based activated carbon in batch and fixed-bed systems," *Bioresource Technology*, **87**, 221~230(2003).
4. Naozumi Kojima, Aki Mitomo, Yoshinori Itaya, Shigenkatsu Mori, and Shuichi Yoshida, "Adsorption removal of pollutants by active cokes produced from sludge in the energy recycle process of wastes," *Waste Management*, **22**, 399~404(2002).
5. Jalan, R. K., Srivastava, V. K., "Studied on pyrolysis of a single biomass cylindrical pellet-kinetic and heat transfer effects," *Energy Conversion & Management*, **40**, 467~494(1999).
6. A. van der Drift, J. van Doorn, and Vermeulen, J. W., "Ten residual biomass fuels for circulating fluidized-bed gasification," *Biomass Bioenergy*, **20**, 45~56(2001).
7. Kurkela, E., "Formation and removal of biomass-derived contaminants in fluidized-bed gasification processes," Ph. D. thesis, VTT Publications, Espoo, 287(1996).
8. 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).
9. Conesa, J. A., Marcilla, A. Moral, R., Moreno-Caselles, J., and Perez-Espinosa, A., "Evolution of gases in the primary pyrolysis of different sewage sludges," *Thermo. Acta*, **313**, 63~73(1998).
10. Kaminsky, W. and Kummer, A. B., "Fluidized Bed Pyrolysis of Digested Sewage Sludge," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **16**, 27~35(1989).
11. Font, R., Fullana, A., Conesa, J. A., and Llavador, F., "Analysis of the pyrolysis and combustion of different sewage sludges by TG," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **58~59**, 927~941(2001).
12. P. Aarne Vesilind and Cheng-Chao Hsu, "Limits of sludge dewaterability," *Water Science and Technology*, **36**(11), 87~91(1997).