

하수처리장 발생 탈수슬러지의 월별 성상 특성

홍순기¹ · 변혜진¹ · 유윤정¹ · 이석기² · 흥태기^{1,†}

¹한서대학교 화학과, ²우석대학교 응용화학과

Monthly Characteristics of Dewatered Sludge from Sewage Treatment Plant

Soon-Gi Hong¹, Hye-Jin Byeoun¹, Yoon-Jung You¹, Seok-Ki Lee², and Tae-Kee Hong^{1,†}

¹Department of Chemistry, Hanseo University, Seosan 31962, Korea

²Department of Scientific Technic·Applied Chemistry, Woosuk University, Wanju 31962, Korea

Received May 7, 2018/Revised May 23, 2018/Accepted June 7, 2018

This study was performed to analyze the monthly characteristics of sewage sludge by analyzing the basic data required for recycling in thermal power generation or as incineration plant auxiliary fuel. Analytical samples were collected from two sites every month for three years, for 72 samples total. Proximate analysis (such as moisture, ash, and volatiles), elemental analysis (C, H, O, N, and S), tube furnace-ion chromatography, and calorimetry (heating value) were performed to evaluate the sludge heating characteristics. Resultantly, the moisture values were 73.2-89.5% (average 82%), the volatile values (dry basis) 44.8-83.0% (average 66.5%), and the low heating values (10% moisture basis) 2,014-4,304 kcal/kg (average 3,248 kcal/kg). The low heating values (10% moisture basis) exceeded the recycling standard of 2,000 kcal/kg, confirming the possibility of recycling the sludge as fuel. When we looked at the monthly heating value of the sewage sludge, it tended to be high in November, December, January, and February. Thus it could be concluded that sewage-sludge-based fuels generated in winter could obtain higher quality with higher heating value when sewage sludge is recycled as fuel.

Key words: Sewage sludge, Heating value, Moisture, Volatile, Ash

1. 서 론

우리나라는 지속적인 하수도 정비사업을 통해서 공공 하수처리구역 인구 보급률을 지속적으로 증가시켜 왔고, 환경부 통계조사 자료에 따르면 2005년 83.5%에 머물던 보급률이 2016년 기준으로 93.2%까지 증가하였다¹⁾. 하수도 보급률 증가는 하수처리장으로 유입되는 하수의 양 증가로 이어졌고, 하수처리 후 발생하는 하수슬러지의 발생량 또한 지속적으로 증가하였다. 2016년 말 기준으로 전국의 가동 중인 공공하수처리시설은 총 649개 (시설규모 500 m³/일 이상)이다. 이 중 고도처리공법이 적용된 시설은 615소로 전체 95.8%를 차지하고 있으며,

시설용량은 10만톤 이상이 18,502천톤으로 72.8%를 차지하고 있다^{2,3)}.

하수슬러지의 발생량은 2006년 기준 7,510 톤/일로 나타났지만 2016년도에는 30% 이상 발생량이 증가하여 9,811 톤/일로 조사되었다¹⁾(Fig. 1). 발생한 하수슬러지는 함수율이 80% 정도로 많은 수분을 함유하고 있어서 처리에 많은 어려움을 가지고 있다.

이러한 하수슬러지의 처리는 정부의 정책 방향에 따라 처리 방법이 크게 변화였다. 2003년도에 하루 10,000톤 이상을 처리하는 하수처리장에서 발생하는 슬러지를 육상 매립장에 반입하는 것을 금지하는 정책이 시행되면서 하수슬러지 처리의 많은 부분이 해양투기로

[†]To whom correspondence should be addressed.

Tel: 82-41-660-1333, E-mail: tkhong1@hanseo.ac.kr

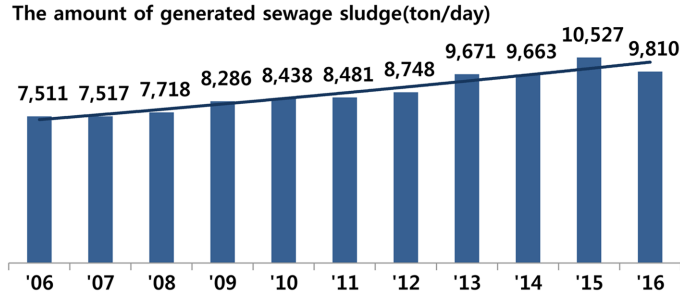


Fig. 1. Annual changes in the amount of generated sewage sludge.

전환되었고 2005년도에 77.9%가 해양에 투기될 정도로 주요 처리방법으로 자리매김하였다. 육상에서 매립 이외의 소각이나 건조 방법으로 처리하기에는 단가가 높았고, 재활용하는 시설이나 인프라가 구축되지 않아서 처리가 용이하고 비용 또한 저렴한 해양투기 방법을 이용할 수밖에 없는 상황이었다. 하지만 우리나라는 1993년도에 런던협약에 가입하였고, 이에 따라서 2012년부터 하수슬러지의 해양투기는 전면 금지되었다. 해양에 투기되던 하수슬러지를 육상에서 처리할 수 있는 시스템을 길지 않은 기간 안에 구축해야 했다^{4,5)}.

2000년대 초반 하수슬러지의 육상처리의 대부분은 소각하여 처분하거나 시멘트소성물로 재활용하여 처리하는 등 일부 몇 가지 처리방법을 이용할 수밖에 없는 상황이었다. 하수슬러지를 육상에서 처리할 수 있는 용량 및 방법을 늘여야 하는 상황에서 2012년까지 연료화, 경량골재 및 시멘트소성물 등으로 재활용하는 방법과, 소각, 건조, 매립 등의 처리 방법을 다양화 하여서 해양에 투기하였던 슬러지를 전량 육상에서 처리할 수 있도록 시스템을 구축하였다. 보다 긍정적인 변화는 2005년 4.8%에 머물던 재활용하는 비율이 2015년도에 57.0%까지 늘어났다는 점이다^{1,6-8)}.

점점 증가하는 하수슬러지의 발생량과 이를 보다 효과적으로 처리하고 재활용하기 위해서 하수슬러지의 물리·화학적 특성에 대한 분석이 필요하다고 판단하였다. 이에 따라 본 연구에서는 화력발전이나 소각 보조연료로 재활용하는데 필요한 기초자료를 확보하고자 매월 발생하는 하수슬러지를 3년간 채취하여 삼성분, 원소분석, 발열량 분석 결과를 바탕으로 월별, 계절별 물리·화학적 특성변화를 분석하고자 하였다^{9,10)}.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험 시료

본 연구에 사용할 시료는 경기도 G시에 위치한 하수처리장에서 채취하였고 하수처리장은 2개의 처리시설은 운영하고 있으며, 유입하수는 주거밀집지역에서 발생하는 하수가 관거를 통해 유입되고 있었다. 제1처리장은 1985년 12월에 가동을 시작하였고, 시설용량 50,000 m³/일, 하수처리 방법은 생물학적 처리 후 순환식 질산화 탈질법, 슬러지 감량화를 위한 소화조를 운영하고 있고, 제2처리장은 1999년 12월에 가동을 시작하였고, 시설용량 110,000 m³/일, 하수처리 방법은 생물학적 처리 후

Table 1. Sewage treatment plant status

	1st sewage treatment plant	2nd sewage treatment plant	
Grit chamber	39.9 m ³ × 4	47.9 m ³ × 4	
Screening	10.73 m ² × 5	4.81 m ² × 7	
1st sedimentation pond	1,570 m ³ × 3	1,250 m ³ × 8	
Reactor	Anaerobic	278.8 m ³ × 8	
	Anoxic	553.5 m ³ × 8	
	Aerobic	404 m ³ × 16	
2st sedimentation pond	1,356 m ³ × 4; 1,570 m ³ × 1	3,847 m ³ × 4	
Disinfection	Ozone	11 kg/hr × 2	22 kg/hr × 2
Sludge thickener		73.9 m ³ × 1	150.7 m ³ × 1
Sludge dewatering		150 kg/m·hr × 3	150 kg/m·hr × 5

순환식 질산화 탈질법, 슬러지 감량화를 위한 소화조를 운영하고 있다(Table 1). 하수처리과정에서 이용된 약품은 슬러지 응집제 용도로 사용한 염화제2철과 소독제인 차아염소산나트륨이 주로 사용되었다.

시료는 제1처리장과 제2처리장에서 각각 탈수슬러지 1 kg 씩 2개 시료를 매월 채취하여 3년 동안 총 72개 시료를 분석하였다. 채취한 시료는 변질 방지를 위하여 채취 즉시 밀폐하여 아이스박스에 담아 실험실로 이동하였고 가능한 신속하게 분석을 진행하였다.

2.2. 수분 분석방법

증발접시를 미리 105~110°C에서 1시간 건조시킨 다음 데시케이터 안에서 방냉하고 항량으로 하여 무게를 정확히 달고 여기에 시료 적당량을 취하여 증발접시와 시료의 무게를 정확히 측정하였다. 다음에 105°C의 건조기 안에서 4시간 건조시킨 다음 데시케이터 안에 넣어 방냉하고 항량으로 하여 무게를 정확히 측정한 후 다음 식으로 수분함량을 구하였다.

수분(%) = (건조전 증발접시와 시료무게-건조후 증발접시와 시료무게) / (건조전 증발접시와 시료무게-건조전 증발접시 무게)

2.3. 가연분

석영제 도가니를 미리 (800±25)°C에서 60분간 강열하고 데시케이터 안에서 방냉한 다음 그 무게를 정밀히 달고 여기에 시료 적당량을 취하여 도가니와 시료의 무게를 측정하였다. 여기에 25% 질산암모늄용액을 넣어 시료를 적시고 천천히 가열하여 탄화시킨 다음 (600±25)°C의 전기로 안에서 30분간 강열하고 데시케이터 안에서 방냉한 후 무게를 달아 도가니에 남아 있는 잔유물의 양을 구하였다.

가연분(%) = {(강열전 도가니와 시료무게-강열후 도가니와 시료무게) / (강열전 증발접시와 시료무게-강열전 도가니 무게)} × {(100-수분) / 100} × 100%

2.4. 회분

회분은 다음 식으로 산출하였다.

회분(%) = 100-수분(%) - 가연분(%)

2.5. 원소분석

항량으로 건조된 시료 약 (2~3) mg을 Cell에 넣은 후 자동원소분석기를 이용하여 회화시켜 검출되는 C, H, N, S 원소의 총량을 측정하였다(사용기기: FLASH EA

1112, THERMO QUEST). 염소는 Tube Furnace Combustion을 이용하여 (1000~1100)°C로 연소할 때 발생하는 염소가스를 임핀저를 이용하였고 흡수액으로 과산화수소 사용하여 포집하여 이온크로마토그래피로 측정하였다. 산소(O)는 100%에서 C, H, N, S, Cl 및 회분함량을 제외한 나머지 부분으로 산출하였다.

2.6. 발열량

항량으로 건조된 시료 (0.5~1.0) g을 산소로 연소시켜 발생한 열량을 Calorimeter (IKA-C2000 basic)로 측정하였다. 열량계를 통해서 측정된 건조시료의 발열량으로부터 고위발열량과 저위발열량을 다음의 식으로 산출하였다.

$$H_h = H_d \times (100 - W) / 100$$

$$H_l = H_h - 600 (9H + W) / 100$$

여기서, H_h: 고위발열량(kcal/kg)

H_l: 저위발열량(kcal/kg)

H_d: 열량계로 측정한 건조시료의 발열량

H: 원소분석에 의한 수소의 조성비(%)

W: 시료 중 수분함량(%)

3. 결과 및 고찰

3.1. 하수슬러지의 연료화 기준

우리나라에서 발생하는 하수슬러지는 여러 가지 방법으로 재활용할 수 있다. 재활용의 기준은 폐기물관리법 시행규칙 [별표5의3]에 다양한 방법을 제시하고 있고, 연료로 이용할 경우 저위발열량이 킬로그램당 3천킬로칼로리 이상이어야 하지만 유기성 오니에서 일부 에너지를 회수한 후 가공하는 경우에는 저위발열량이 킬로그램당 2천킬로칼로리 이상이어야 한다고 나와 있다. 본 연구에 사용되는 슬러지는 소화조를 거쳐 일부 에너지를 메탄가스로 회수하였기 때문에 저위발열량이 킬로그램당 2천킬로칼로리 이상을 만족하면 재활용이 가능하다. 대부분의 하수슬러지는 수분 함량을 80% 전후로 보유하기 때문에 연료로 재활용하기 위해서는 가공이 필요하고 가공된 연료는 수분함량이 10% 이하, 회분 함량(건조된 상태 기준) 35% 이하, 황분 함량(건조된 상태 기준) 2% 이하여야 한다. 다만 화력발전소에서 연료로 사용하는 경우에는 회분 함량이 35%를 초과할 수 있다¹¹⁾. 따라서 하수슬러지를 연료로 재활용하기 위해서는 수분함량을 10% 이하로 건조할 필요가 있다.

3.2. 하수슬러지의 분석결과

3년간의 월별 하수슬러지의 성상 분석 결과는 Tables 2, 3과 같다.

하수슬러지의 처리 및 재활용에 가장 큰 영향 인자인 수분의 측정 결과는 1처리장은 76.6%(2nd Apr)~ 89.5%

(3rd May), 2처리장은 73.2%(1st Aug)~84.9%(3rd Dec)

로 조사되어 월별 수분의 최대 편차는 10% 이상 나오는 것으로 조사되었다(Figs. 2와 3). 년도별 수분이 높았던 시기는 1처리장의 경우 1, 2, 3차년 모두 3월이었고, 2처리장은 1차년도 11월, 2차년도 4월, 3차년도 12월 순

Table 2. Result of the monthly sewage sludge character from the 1st sewage treatment plant

	Proximate analysis (%)			Ultimate analysis (dry basis, %)						Heating value (kcal/kg)		Heating value (10% moisture basis, kcal/kg)		Hd (dry basis, kcal/kg)
	Moisture	Ash	Volatile	C	H	O	N	S	Cl	Hh	HI	Hh	HI	
Average	83.0	5.6	11.4	35.1	5.2	21.1	5.5	0.6	0.1	633	88	3,396	3,293	3,773
Min.	76.6	2.2	8.0	26.6	3.5	12.0	2.8	0.1	0.0	403	-150	2,370	2,276	2,633
Max.	89.5	11.6	14.4	43.3	6.5	27.5	7.8	1.1	0.2	841	288	4,411	4,304	4,901
RSD(%)	3.8	40.0	15.3	13.3	15.4	16.5	23.8	35.4	32.8	18.5	138.7	15.6	16.0	15.6
1st-Jan	82.1	4.7	13.2	41.6	5.9	18.9	6.6	0.5	0.2	762	213	3,833	3,721	4,259
1st-Feb	83.9	3.9	12.2	39.6	5.9	21.9	7.1	0.9	0.1	703	148	3,928	3,821	4,364
1st-Mar	87.7	2.8	9.5	40.7	6.2	22.1	7.3	0.9	0.1	550	-17	4,025	3,928	4,472
1st-Apr	82.6	5.1	12.3	36.6	5.5	22.1	5.3	0.9	0.1	713	166	3,689	3,583	4,099
1st-May	83.6	3.8	12.6	39.5	6.1	23.8	6.5	0.6	0.1	710	155	3,897	3,789	4,331
1st-Jun	80.2	6.1	13.7	36.7	6.0	20.2	5.5	0.9	0.1	794	248	3,607	3,489	4,008
1st-Jul	81.7	5.8	12.5	34.6	5.7	21.4	5.6	0.8	0.1	710	164	3,493	3,383	3,882
1st-Aug	78.4	9.0	12.6	26.6	4.4	22.0	4.2	1.1	0.1	689	168	2,873	2,767	3,192
1st-Sep	83.7	5.6	10.7	34.3	5.6	19.4	5.7	0.8	0.1	616	65	3,403	3,299	3,781
1st-Oct	80.3	8.3	11.4	28.8	3.5	22.1	2.8	0.6	0.1	519	0	2,370	2,276	2,633
1st-Nov	81.2	7.3	11.5	31.1	4.1	21.6	3.5	0.8	0.1	581	52	2,781	2,684	3,090
1st-Dec	76.8	10.0	13.2	31.4	4.5	16.2	4.3	0.6	0.1	766	248	2,970	2,859	3,300
2nd-Jan	79.2	7.4	13.4	36.2	5.3	17.0	4.9	0.8	0.1	802	267	3,471	3,357	3,857
2nd-Feb	83.9	2.9	13.2	41.1	6.3	26.2	7.8	0.3	0.1	747	189	4,178	4,069	4,643
2nd-Mar	85.2	3.5	11.3	36.4	5.7	27.5	6.8	0.1	0.1	616	59	3,744	3,643	4,160
2nd-Apr	76.6	11.6	11.8	27.1	4.1	15.2	3.2	0.8	0.1	699	188	2,689	2,583	2,988
2nd-May	81.3	7.8	10.9	31.0	4.7	16.9	4.9	0.5	0.1	622	86	2,992	2,889	3,324
2nd-Jun	78.0	8.0	14.0	33.3	5.0	20.1	4.7	0.3	0.1	781	254	3,197	3,083	3,552
2nd-Jul	84.7	4.9	10.4	34.8	5.4	21.5	5.5	0.5	0.1	578	25	3,402	3,301	3,780
2nd-Aug	80.5	8.3	11.2	29.5	4.3	18.5	4.4	0.7	0.1	624	96	2,880	2,779	3,200
2nd-Sep	84.7	6.2	9.1	31.2	4.8	18.0	4.8	0.7	0.1	517	-30	3,044	2,948	3,382
2nd-Oct	81.9	6.5	11.6	33.4	4.9	20.2	5.0	0.4	0.1	689	150	3,425	3,322	3,806
2nd-Nov	85.7	4.2	10.1	36.1	5.5	21.4	6.6	0.6	0.1	548	-9	3,446	3,348	3,829
2nd-Dec	86.4	3.6	10.0	38.1	5.7	22.1	6.5	0.7	0.1	555	-5	3,675	3,577	4,084
3rd-Jan	82.5	4.0	13.5	42.4	6.2	21.4	6.9	0.5	0.0	764	210	3,929	3,816	4,365
3rd-Feb	82.8	4.4	12.8	35.8	5.3	26.5	5.6	1.0	0.1	623	77	3,259	3,155	3,621
3rd-Mar	85.3	2.5	12.2	43.3	6.5	12.0	6.2	0.8	0.1	720	157	4,411	4,304	4,901
3rd-Apr	81.9	3.7	14.4	42.1	6.3	23.5	7.2	0.6	0.1	841	288	4,184	4,068	4,649
3rd-May	89.5	2.2	8.3	40.3	6.3	24.8	6.8	0.6	0.1	485	-88	4,154	4,062	4,616
3rd-Jun	85.4	4.2	10.4	35.8	5.2	23.7	5.6	0.5	0.1	606	53	3,735	3,639	4,151
3rd-Jul	86.5	4.5	9.0	30.8	4.7	26.6	4.2	0.3	0.2	403	-150	2,687	2,596	2,985
3rd-Aug	85.3	5.6	9.1	31.8	5.2	19.4	5.4	0.3	0.1	493	-60	3,020	2,922	3,355
3rd-Sep	83.6	6.2	10.2	27.0	3.9	27.4	3.4	0.4	0.1	441	-95	2,421	2,330	2,691
3rd-Oct	85.7	6.0	8.3	30.3	4.6	17.5	5.1	0.7	0.1	454	-95	2,860	2,768	3,178
3rd-Nov	80.7	7.0	12.3	35.8	3.9	19.7	3.6	0.7	0.1	638	113	2,975	2,878	3,305
3rd-Dec	89.0	3.0	8.0	37.5	5.5	22.0	6.8	0.8	0.1	440	-127	3,598	3,509	3,998

Table 3. Result of the monthly sewage sludge character from the 2nd sewage treatment plant

	Proximate analysis (%)			Ultimate analysis (dry basis, %)						Heating value (kcal/kg)		Heating value (10 % moisture basis, kcal/kg)		Hd (dry basis, kcal/kg)
	Moisture	Ash	Volatile	C	H	O	N	S	Cl	Hh	HI	Hh	HI	
Average	80.9	6.9	12.2	33.9	5.1	20.2	5.1	0.6	0.1	690	153	3,310	3,203	3,678
Min.	73.2	3.4	10.0	24.3	3.7	10.9	3.2	0.2	0.0	543	12	2,120	2,014	2,355
Max.	84.9	13.8	16.0	44.3	6.3	26.9	8.0	1.1	0.2	888	345	4,032	3,922	4,480
RSD(%)	3.4	39.5	11.7	15.6	14.1	16.5	21.8	33.3	36.7	12.8	56.5	16.4	16.9	16.4
1st-Jan	78.4	6.3	15.3	38.5	5.5	20.0	6.1	0.5	0.1	879	345	3,664	3,546	4,071
1st-Feb	81.6	5.4	13.0	37.7	5.5	20.6	5.9	1.1	0.1	760	215	3,716	3,606	4,129
1st-Mar	82.8	4.0	13.2	36.9	6.0	26.4	6.2	1.1	0.1	764	211	3,996	3,886	4,441
1st-Apr	82.3	4.8	12.9	36.6	5.5	24.1	5.8	0.9	0.1	744	198	3,785	3,677	4,205
1st-May	81.4	5.5	13.1	36.9	5.5	22.3	4.7	1.0	0.1	744	201	3,601	3,492	4,002
1st-Jun	80.3	7.2	12.5	31.7	5.1	21.3	4.8	0.6	0.1	691	155	3,156	3,047	3,507
1st-Jul	79.2	8.0	12.8	29.9	5.2	20.9	4.8	0.7	0.1	712	179	3,082	2,969	3,425
1st-Aug	73.2	13.8	13.0	24.3	4.1	15.2	4.1	0.7	0.1	683	184	2,292	2,179	2,547
1st-Sep	76.7	11.8	11.5	24.7	4.1	16.5	3.4	0.7	0.1	618	106	2,388	2,282	2,654
1st-Oct	77.8	9.0	13.2	26.7	4.6	22.4	4.9	0.9	0.1	750	229	3,042	2,933	3,381
1st-Nov	84.0	5.0	11.0	35.1	5.3	21.6	5.9	0.7	0.1	606	56	3,409	3,308	3,788
1st-Dec	81.3	5.2	13.5	39.3	5.6	20.6	6.1	0.6	0.1	776	232	3,736	3,625	4,152
2nd-Jan	82.0	5.4	12.6	38.7	5.7	18.6	6.2	0.5	0.1	740	193	3,702	3,592	4,113
2nd-Feb	79.6	4.4	16.0	38.9	5.9	26.2	6.8	0.5	0.1	888	345	3,916	3,798	4,352
2nd-Mar	77.9	10.0	12.1	25.9	3.9	20.4	4.2	0.2	0.1	648	134	2,638	2,536	2,931
2nd-Apr	84.5	4.2	11.3	39.5	5.9	20.8	5.7	0.7	0.1	680	123	3,947	3,843	4,386
2nd-May	79.9	7.3	12.8	33.7	4.9	19.9	4.5	0.5	0.1	755	223	3,381	3,273	3,757
2nd-Jun	82.3	5.8	11.9	36.8	5.3	20.6	4.3	0.4	0.1	694	149	3,528	3,422	3,920
2nd-Jul	77.6	7.5	14.9	34.4	5.2	21.7	4.6	0.6	0.1	825	297	3,317	3,200	3,685
2nd-Aug	81.8	8.2	10.0	29.1	4.0	17.6	3.7	0.6	0.1	543	13	2,687	2,592	2,986
2nd-Sep	81.9	6.7	11.4	30.9	4.8	21.7	4.9	0.5	0.1	601	63	2,990	2,888	3,323
2nd-Oct	83.5	6.3	10.2	30.9	5.9	19.7	4.7	0.7	0.1	586	32	3,196	3,089	3,551
2nd-Nov	83.2	5.3	11.5	37.8	5.2	19.3	5.6	0.7	0.1	665	118	3,561	3,458	3,957
2nd-Dec	83.2	4.7	12.1	38.4	5.9	21.0	6.1	0.8	0.1	676	123	3,622	3,514	4,025
3rd-Jan	83.5	3.7	12.8	44.3	6.2	19.5	6.7	0.6	0.1	739	183	4,032	3,922	4,480
3rd-Feb	83.6	3.4	13.0	39.5	5.6	26.9	6.6	0.8	0.1	727	176	3,988	3,884	4,432
3rd-Mar	82.8	4.6	12.6	42.2	6.3	23.7	8.0	0.4	0.1	769	214	4,023	3,911	4,471
3rd-Apr	81.5	5.9	12.6	36.2	5.3	20.0	5.7	0.7	0.1	726	184	3,534	3,426	3,927
3rd-May	83.8	5.2	11.0	35.1	5.2	21.7	4.8	0.8	0.1	656	108	3,645	3,544	4,050
3rd-Jun	82.8	6.4	10.8	31.8	4.5	21.7	4.6	0.4	0.0	610	71	3,190	3,092	3,545
3rd-Jul	78.6	9.1	12.3	30.9	4.6	17.2	4.4	0.3	0.2	723	199	3,042	2,934	3,380
3rd-Aug	80.6	9.2	10.2	27.4	4.3	16.6	4.1	0.3	0.0	576	48	2,673	2,572	2,970
3rd-Sep	77.5	12.3	10.2	25.4	3.7	12.6	3.2	0.4	0.0	546	36	2,183	2,082	2,425
3rd-Oct	75.2	13.7	11.1	25.7	3.8	10.9	3.6	0.6	0.1	584	82	2,120	2,014	2,355
3rd-Nov	82.0	7.0	11.0	32.5	6.0	18.2	3.5	0.7	0.1	604	54	3,020	2,907	3,355
3rd-Dec	84.9	5.1	10.0	35.1	5.0	19.5	6.0	0.8	0.1	562	12	3,353	3,256	3,725

으로 높게 나타났다. 날씨가 추운 겨울철이나 초봄에 수분이 높게 나오는 추세를 보이고 있고, 반대로 온도가 높은 시기에는 수분함량이 낮은 경향을 보이고 있다. 1, 2처리장의 3년간의 수분함량 평균은 82%로 연료로 재

활용하기 위해서는 10% 이하까지 건조할 수 있는 시설이 필요하고 이에 따른 많은 에너지가 필요할 것으로 판단된다.

연료로 재활용할 경우 가장 중요한 인자는 저위발열

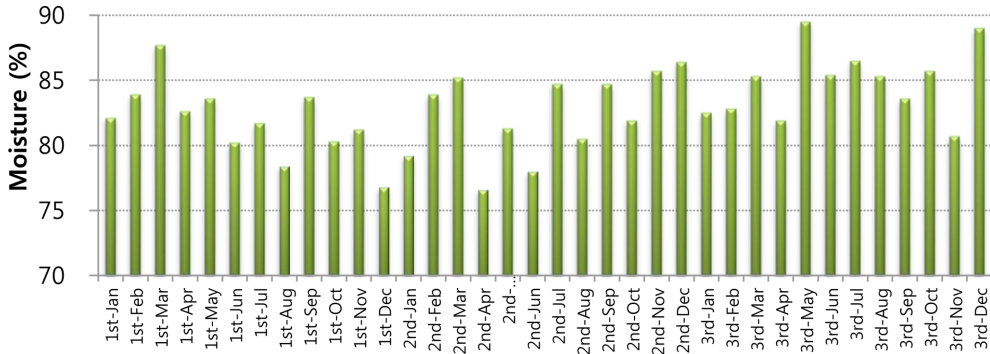


Fig. 2. The monthly sewage sludge moisture (%) from the 1st sewage treatment plant.

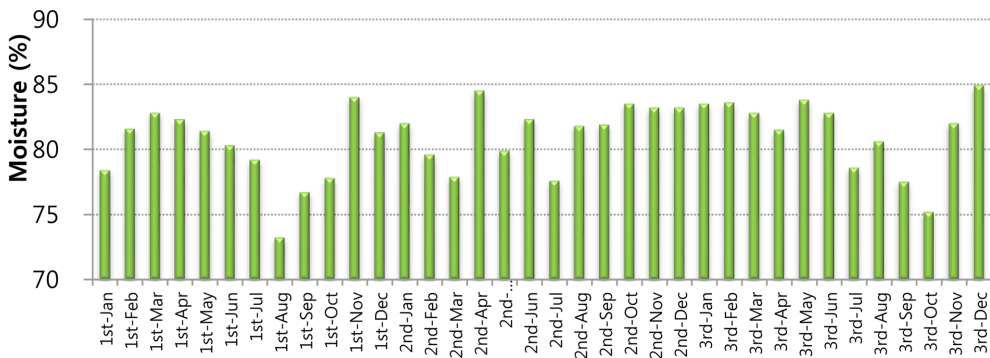


Fig. 3. The monthly sewage sludge moisture (%) from the 2nd sewage treatment plant.

량 값으로 분석 결과표에 3종류의 발열량 값으로 표현되어있다. Hd로 표현된 건조고위발열량은 수분을 완전 건조한 시료를 Calorimeter로 측정하여 얻은 발열량 값으로 시료가 열량계 내에서 연소할 때 발생하는 H₂O가 액체상태로 존재하기 때문에 증발잠열에 의한 손실이 없는 순수하게 연소 시 발생하는 열량이다. Hh로 표현된 고위발열량은 수분을 함유한 원상태의 시료가 연소할 시에 발생하는 열량으로 수분의 증발잠열에 의한 열량 손실이 없는 값을 말한다. HI로 표시된 저위발열량은 연료로서의 가능성을 판단하는 중요한 수치로 수분을 함유한 원상태의 시료가 연소할 시에 발생하는 열량에서 증발잠열에 의한 열손실을 제외한 소각이나 발전 연료로 재활용할 경우 실제로 적용되는 열량을 의미한다.

제1하수처리장의 건조고위발열량은 2,633 kcal/kg(1st-Oct)~4,901 kcal/kg(3rd-Mar), 제2하수처리장은 2,355 kcal/kg(3rd-Oct)~4,480 kcal/kg(3rd-Jan)로 조사되어 월별 하수슬러지의 건조고위발열량의 편차가 2,000 kcal/kg 이상 나타날 수 있는 것으로 조사되었다. 이는 하수

슬러지를 기반으로 연료를 생산할 경우 생산 시기에 따라 열량의 편차가 발생하여 일정한 품질의 연료를 생산하는데 어려움이 발생할 수 있다는 것을 의미한다. 처리장별 건조고위발열량이 높은 시기는 제1처리장은 3차년도 3월, 2차년도 2월, 3차년도 4월 순으로 분석되었고, 제2처리장은 3차년도 1월, 3차년도 3월, 1차년도 3월 순으로 조사되었다. 건조고위발열량이 높은 시기는 수분이 높은 시기와 유사하게 날씨가 추운 겨울철이나 초봄에 높은 경향을 보이고 있고, 반대로 온도가 높은 시기에 낮은 추세를 보이고 있다.

수분함량이 높은 원시료 상태의 저위발열량은 최소 150 kcal/kg(1처리장 3rd-Jul)에서 최대 345 kcal/kg(2처리장 2nd-Feb)로 나타나서 연료로써 가치는 없는 것으로 조사되었고, 연료로 재활용 하기 위해서는 건조과정을 통해서 수분함량을 낮추고 저위발열량을 높이는 과정이 필요할 것으로 보인다.

우리나라에서 하수슬러지를 연료로 재활용하기 위한 수분의 최대함유 가능 값은 10%이다. 본 연구에서 분석

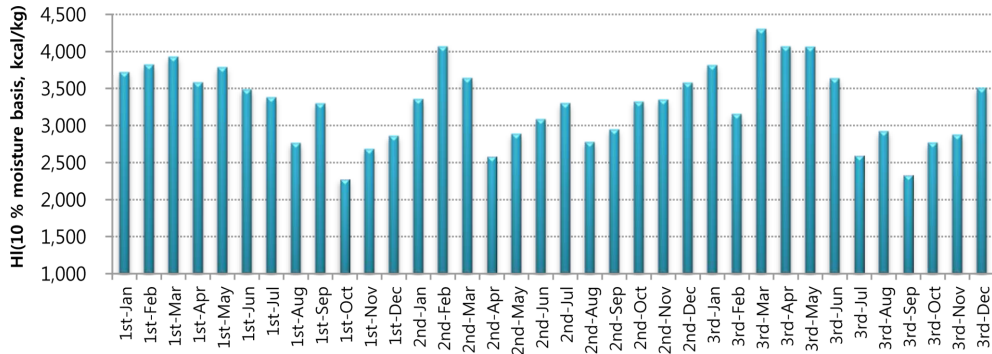


Fig. 4. The monthly sewage sludge low heating value (kcal/kg) (10% moisture basis) from the 1st sewage treatment plant.

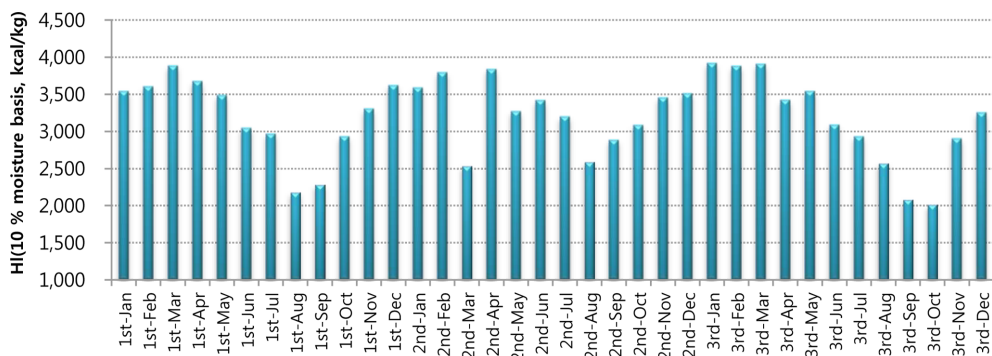


Fig. 5. Graph of the monthly sewage sludge low heating value (kcal/kg) (10% moisture basis) from the 2nd sewage treatment plant.

을 진행한 하수슬러지를 건조과정을 통해서 연료화를 진행한다고 가정했을 때 수분함량을 10% 기준으로 저위 발열량을 산출한 결과는 제1처리장은 2,276 kcal/kg (1st-Oct)~4,304 kcal/kg(3rd-Mar)이었으며(Fig. 4), 제2 처리장은 2,014 kcal/kg(3rd-Oct)~3,922 kcal/kg(3rd-Jan)로 나왔다(Fig. 5). 월평균 저위발열량은 제1처리장 3,293 kcal/kg, 제2처리장 3,203 kcal/kg으로 산출되었다. 제1처리장의 표준편차는 526 kcal/kg, 제2처리장은 541 kcal/kg로 슬러지를 연료로 재활용할 경우 월별로 저위발열량의 품질 차이는 발생할 것으로 보이지만, 연료로 재활용할 수 있는 저위발열량의 최소값인 2,000 kcal/kg을 모두 초과하여 재활용의 가치는 있는 것으로 판단된다.

4. 결 론

하수처리장에서 발생하는 하수슬러지를 3년간 매월 분석한 결과 물리적 성상과 열량특성이 월별로 차이가 있

었다. 하수슬러지 처리의 중요 인자인 수분 함량은 평균 82.0%(최소: 73.2%, 최대: 89.5%)로 물리적 구성의 대부분을 차지하고 있었고, 연료로 재활용할 경우 수분 제거를 위한 시설과 많은 에너지가 필요할 것으로 판단되며, 연료로 재활용하기 위한 수분함량의 최대값인 10% 기준으로 저위발열량을 산출하였을 때, 2,014~4,304 kcal/kg(평균 3,248 kcal/kg)로 나와서 연료로 재활용할 수 있는 저위발열량의 최소값인 2,000 kcal/kg을 모두 초과하여 재활용의 가치는 있는 것으로 확인되었다.

월별 수분함량 10% 기준 저위발열량의 변화를 분석한 결과 날씨가 추운 11월에서 3월 사이에 높은 경향을 보이고 있지만 온도가 높은 시기인 7월부터 10월에는 낮은 추세를 보이고 있다. 이는 생물학적 처리를 통해서 유기물을 분해하는 하수처리 방식의 특성상 미생물의 활성이 높은 여름철에 유기물 분해효율 또한 높기 때문에 유기물의 함량이 낮아져서 저위발열량이 낮게 나오는 경향을 보이는 반면 미생물 활성이 낮아지는 겨울철에는

저위발열량이 높은 것으로 추정된다.

이에 따라 하수슬러지를 연료로 재활용할 경우 여름철에 발생한 하수슬러지 기반의 연료보다 겨울철에 발생한 하수슬러지 기반의 연료가 보다 높은 열량을 가진 고질의 연료를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 환경부, 하수도 통계, **2016**.
2. 박재은, 김민욱, 이건주, 백지원, 이석기, “표준활성슬러지 공정의 Acetaminophen과 Sulfamethoxazole 노출에 대한 적응성 평가,” *한국환경분석학회지*, **2016**, 19(2), 119-125.
3. 2014년도 공공하수처리시설 운영관리실태 분석결과, **2014**, 환경부.
4. 강정희, 강종윤, 이시형, 김병태, 이남훈, “건조하수슬러지의 석탄 혼소를 위한 연료특성 및 경제성 평가에 관한 연구,” *유기물자원화*, **2014**, 22(1).
5. 김준형, 최우진, 임봉수, “우리나라 하수슬러지의 처리현황 및 건조연료화 개선 방안,” *대전대학교 환경문제연구*
6. D. G. Lee, J. S. Lee, H. Kwak, and S. Y. Bae, “Co-combustion characteristics of sewage sludge and RDF, ministry of commerce”, *Industry and Energy*, **2004**, 254-266.
7. C. Storm, H. Rüdiger, H. Spliethoff, and K. R. G. Hein, “Co-pyrolysis of Coal/biomass and Coal/sewage Sludge Mixtures,” *J. Eng. Gas Turb. Power*, **1999**, 121, 55-63.
8. J. Werther, “Potentials of Biomass Co-Combustion in Coal-Fired Boilers”, The 20th International conference on fluidized bed combustion, May **2009**, 18-20.
9. H. So, K. H. Kim, N. S. Roh, and T. I. Ohm, “Study on the RDF combustion characteristics in rolling-great type small-size boiler”, *J. Korea Soc. Waste Management*, **2002**, 19(5), 534-541.
10. G. Q. Liu, Y. Itay, R. Yamazaki, S. Mori, M. Yamaguchi and M. Kondoh “Fundamental study of the behavior of chlorine during the combustion of single RDF” *Waste Management*, **2001**, 21, 427-433.
11. 폐기물관리법 시행규칙, 시행 2018.1.18., 환경부령 제 745호.