

# 폐목재 혼합에 따른 하수슬러지 탈수성 및 발열량 특성 연구

진용균·조은지·현원수·한현구·민선웅\*·여운호\*\*

A Study on the Characteristics of Dewaterability and Calorific Value of Sewage Sludge by Mixing Waste Wood

Jin, Yong Gyun·Jo, Eun Ji-Hyun, Wan Su-Han, Hyun Goo·Min, Sun Ung·\*Yeo, Woon Ho\*\*

**Abstract:** The land treatment of sewage sludge is necessary because sewage sludge is increasing year by year. Therefore the research of sewage sludge solidification is underway as one of the land treatment methods. However, the problem with existing sewage sludge solidification is that the moisture content of sewage sludge is high and the dewaterability is low. Because of high drying cost the efficiency of energy production is low and the calorific value is insufficient. So the disposer is supplied with a filtration and caloric aid for improving dewaterability and calorific value.

In this study, it is aimed to improve the fuel value of sewage sludge by confirming the feasibility of waste wood as a filtration and caloric aid. The dewaterability was measured by CST-test and the calorific value was measured by bomb calorimeter. As a result the dewaterability and calorific value are improved in all of the samples. The dewaterability was improved as the waste wood was added in the sewage sludge. By adjusting the waste wood adding rate into the sewage sludge the dewaterability and calorific value of sewage sludge will be improved. This study confirmed possibility of the waste wood used as filtration and caloric aid.

**키워드:** 하수슬러지, 폐목재, 탈수성, CST, 발열량

**Keywords:** Sewage sludge, Waste wood, Dewaterability, CST, Calorific value

## 1. 서론

2015년 전국 625개의 공공하수처리시설 중 93개소가 하수슬러지 처리시설을 운영하고 있었으며, 약 10,527톤/일의 하수슬러지가 발생되었다. 연간 300만톤 이상이 발생하고, 해마다 증가하는 추세로 해당 하수슬러지의 육상처리 필요성이 대두되고 있다.<sup>1,2)</sup>

환경부 통계자료에 의하면 생활계, 사업장계, 건설계 3개 분야를 합한 폐목재의 발생량은 2002년에 연간 2,121,927톤이었으나 2010년에는 연간 1,933,406톤으로 2002년에 비해 8.8%가 감소하였고, 생활계, 사업장계, 건설계 분야의 폐목재의 발생량은 모두 증감을 반복하고 있다. 2005년도까지는 건설계 폐목재의 발생량과 비례하였으나 2006년도 이후에는 생활계 폐목재의 발생량과 비례하는 경향을 보이고 있는 실정으로 이를 적절히 처리하지 않으면 심각한 환경문제를 유발 할 수 있다.<sup>3)</sup>

폐목재를 활용하여 하수슬러지를 연료화한다

면 슬러지의 육상처리와 동시에 연료화로 인해 국내 에너지생산에 기여할 것으로 사료되지만 현재까지는 이와 관련된 연구가 충분히 이루어지지 못하였다. 따라서 하수슬러지 육상처리와 연료화에 기여할 수 있도록 폐목재 혼합에 따른 하수슬러지 탈수성 및 발열량 특성을 연구를 하게 되었다.<sup>4,5)</sup>

## 2. 연구방법

### 2.1. 실험재료

#### (1) 하수슬러지

본 연구에서 인천 A하수처리장 탈수기 유입전 하수슬러지를 채취해 4℃ 이하 냉암소에 보관해 시료로 사용하였으며, 하수슬러지의 특성은 표 1 및 표 2와 같다. HHV(High Heat Value)가 2,866.00 kcal/kg으로 연료화 대상이 될 수 있는 조건을 갖고 있으며, CST(Capillary Suction Time)가 84.6sec 값을 갖고 있어 탈수가 요구되었다. 또한 유기물(VS) 함량이 52.05%로 적절한

\* 인천대학교 대학원 환경에너지공학과 석사

\*\* 인천대학교 대학원 환경에너지공학과/ 도시과학대학 환경공학전공 교수, 교신저자(whyeo@inu.ac.kr)

첨가물을 혼합할 경우 연료화가 가능함을 보이고 있으며, 화학적 원소분석 결과 발열량이 높은 탄소 등의 값이 비교적 낮지 않아 연료화 가능성이 있음을 확인하였다.

표 1. 하수슬러지 물리적 특징

HHV (kcal/kg)	CST (sec)	pH	SS (mg/l)	VS/TS (%)	수분 (%)	회분 (%)	휘발분 (%)	고정 탄소 (%)
2,866.00 ±56.15	84.6 ±5.6	7.03 ~7.27	14,918 ±2,733	52.05 ±0.65	97.63 ±0.31	1.14 ±0.16	1.02 ±0.10	0.21 ±0.05

표 2. 하수슬러지 화학적 원소분석

N(%)	C(%)	H(%)	S(%)	O(%)
3.20±0.07	22.54±0.13	3.41±0.03	1.20±0.06	69.65±0.11

(2) 폐목재

본 연구에서 B폐기물처리장 반입 폐목재를 채취하여 2mm 이하로 분쇄하여 시료로 사용하였으며, 폐목재의 특성은 표 3 및 표 4와 같다. HHV가 4,482.81 kcal/kg으로 비교적 높은 열량을 함유하였고, 폐목재에 수분 함량이 높지 않아 CST는 측정할 수 없는 상태였다. 유기물(VS) 함량이 92.54%로 높아 혼합재로 사용하기 좋은 조건을 갖고 있었으며, 화학적 원소분석 결과 발열량이 높은 탄소 등의 값이 비교적 높아 연료화에 유리함을 확인하였다.

표 3. 폐목재 물리적 특징

HHV (kcal/kg)	CST (sec)	pH	SS (mg/l)	VS/TS (%)	수분(%)	회분 (%)	휘발분 (%)	고정 탄소 (%)
4,482.81 ± 174.67	-	6.18~6.66	-	92.54 ± 3.13	17.59 ± 1.31	6.17 ± 2.65	51.37 ± 3.46	24.86 ± 4.98

표 4. 폐목재 화학적 원소분석

N(%)	C(%)	H(%)	S(%)	O(%)
10.19±1.61	50.45±0.69	7.04±0.33	0.07±0.01	32.26±2.63

2.2. 실험 방법

실험설계 방법은 표 5에 나타내었다. 연료화를 통한 하수슬러지 육상처리 가능성을 찾는 것이 주된 연구 대상이므로 폐목재는 재활용율이 높아 하수슬러지 혼합용으로 원활하게 공급이 되지 않을 수 있어 폐목재 혼합율을 최소화 한 조건에서 탈수성 및 발열량 특징을 살피고자 기

존의 선행 연구를<sup>6,7,8)</sup> 고려하여 하수슬러지 대비 폐목재를 1%, 2%, 3%, 4%, 5%의 비율로 혼합하였다. 혼합한 시료를 대상으로 탈수성과 발열량을 측정하여 혼합하였을 경우 하수슬러지의 탈수성과 열량 변화를 분석하였다. 또한 탈수성과 발열량의 변화원인을 규명하기 위해 공업분석, 유기물함량 측정, 총부유물질 측정, pH 측정, 원소분석을 실시하였다.

표 5. 실험 설계

No	혼합 비율 (폐목재/하수슬러지)(%)	변수	
		폐 목재(g)	하수슬러지(mL)
1	1	10	1,000
2	2	20	1,000
3	3	30	1,000
4	4	40	1,000
5	5	50	1,000

(1) 탈수성 측정

CST(Capillary Suction Time)는 비저항값을 근사적으로 표현하는 간단한 실험 방법으로, 슬러지내의 수분이 첫 전극에 도달하면 타이머가 작동하기 시작하고 두 번째 전극에 도달하면 타이머가 작동을 멈추게 된다. 이 때 두 전극 사이의 거리 1cm를 이동하는데 걸리는 시간을 CST라 부른다.<sup>9)</sup> 실험방법은 혼합된 시료를 150rpm으로 30초간 급속 교반하여 혼합이 골고루 되게 하고, 40rpm으로 90초간 완속 교반한 다음 교반장치의 회전을 멈춘 후 응집이 되게 하였다. 이후 5mm 체거름망을 통해 거른 시료를 내경이 18mm인 funnel에 주입하여 CST를 측정하였다. 본 실험에서 CST 측정 장치로 Type 304M(Triton Electronics, England)을 사용하였으며, 측정치는 3번 측정된 평균값으로 하였다.

(2) 발열량 측정

시료의 발열량은 봄베식 열량계(Parr 6100)를 사용하였으며, 봄베 내에 약 1g의 건조시료를 40psi압력의 산소를 공급해 연소시켜 전, 후 물의 온도 차이로부터 구하게 된다. 측정된 발열량은 건조기준 고위발열량이며, 모든 측정치는 3번 측정된 평균값으로 하였다.

(3) pH 측정

pH는 알칼리도와 관련이 있으며, 응집반응에 매우 큰 영향을 미친다. 응집반응은 하수슬러지의 탈수성에 밀접한 관련이 있으므로 pH는 탈수성 평가의 중요한 인자로 판단된다. 본 연구에서

는 이러한 시료의 pH를 측정하여 혼합시료의 탈수성과 pH의 관계를 알아보고자 유리전극법에 의한 pH측정기(Combined pH electrode with temperature probe)를 사용하여 수소이온농도를 측정하였다. 모든 측정치는 3번 측정한 평균값으로 하였다.

(4) 공업분석

석탄 등 고형연료 품질기준의 주된 기준인 수분, 회분, 휘발분, 고정탄소의 4성분 분석인 공업분석을 수행하였다.<sup>10)</sup> 수분, 회분, 휘발분은 분석을 통해 구하였으며, 고정탄소는 전체 (100%)에서 수분, 회분, 휘발분값을 공제해 산출하였다.

(5) 유기물함량 측정

폐기물의 강열감량 및 유기물 함량을 측정하는 방법으로 시료를 질산암모늄 용액(25%)을 넣고 가열하여 탄화시킨 다음, 600 ± 25 °C의 전기로 안에서 3시간 가열하고 데시케이터에서 식힌 후 무게를 달아 무게 차이로부터 강열감량 및 유기물 함량(%)을 구하였다.<sup>11)</sup>

(6) 총부유물 측정

시료를 직경 2mm 금속망에 통과시킨 후 유리섬유 여과지(GF/C)를 여과장치에 부착하여 일정량의 시료를 여과시킨 다음 항량으로 건조하여 무게를 달아 여과 전·후의 무게차를 산출하여 부유물질을 측정하며, 수질오염공정시험기준을 따랐다.

(7) 원소분석

유기시료를 섭씨 1,000°C 이상 고온에서 산화 분해하여 환원과정을 거쳐 열전도도 검출기로 검출할 수 있도록 이온화한 후 C, H, N, S 및 O원소의 정성, 정량분석하는 원리이다. 본 연구에서는 원소분석기(Vario Micro Cube)로 탄소(C), 수소(H), 질소(N), 황(S)의 분석을 실시하였고, 산소(O)는 100%에서 나머지 분석된 C, H, N, S 원소 값(%)을 공제한 수치를 사용하였다. 모든 측정치는 3번 측정한 평균값으로 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 탈수성 측정

탈수성 측정항목인 CST 측정결과는 표 6과 같으며, 하수슬러지 대비 폐목재 혼합비율 1%에서는 CST가 82.0%, 2%에서는 81.9%, 3%에서는 81.1%, 4%에서는 77.1%, 5%에서는 72.2%로 폐목재 혼합비율이 증가함에 따라 CST값이 감소함을 보였다. 이는 탈수성이 향상됨을 의미한다. 이는

기존 선행연구에서<sup>6,7,8)</sup> 폐목재 등 혼합비율 증가에 따른 탈수성 향상 효과와 유사한 결과를 보였다.

표 6. CST 측정 결과

No	혼합 비율(%)	1st(sec)	2nd(sec)	3rd(sec)	Avg.(sec)
1	1	82.5	74.3	89.3	82.0±7.5
2	2	79.6	86.5	79.6	81.9±4.0
3	3	81.6	93.1	68.5	81.1±12.3
4	4	64.0	84.1	83.3	77.1±11.4
5	5	59.7	75.5	81.5	72.2±11.3

3.2. 발열량 측정

발열량 측정 결과는 표 7과 같으며, HHV는 3,656.43 ~ 4,081.64kcal/kg 이었지만 하수슬러지 수분함량이 높아 LHV(Low Heat Value)는 -737.94 ~ -570.02kcal/kg으로 나타났다. 하지만 고형연료 기준이 수분 10%로 이 조건에 맞추기 위해 탈수 및 건조를 하여 수분 10%로 처리 하였을 경우 LHV는 2,973.07 ~ 3,318.99kcal/kg으로 나타나 연료로 가치가 충분함을 알 수 있었다. 또한 하수슬러지에 폐목재를 혼합할 경우 하수슬러지 보다 높은 발열량을 보였고, 폐목재의 혼합비율이 증가함에 따라 발열량이 증가함을 보였다.

표 7. 발열량 측정 결과

(단위 : kcal/kg)

No	혼합 비율(%)	HHV	LHV	LHV *
		(dry basis, Hh)	(wet basis, Hl)	(wet basis, Hl)
1	1	3,656.43±1.56	-737.94±0.04	2,973.07±1.40
2	2	3,867.44±37.75	-691.48±1.41	3,169.68±33.97
3	3	3,918.62±244.92	-647.04±11.05	3,215.76±220.43
4	4	3,956.62±74.90	-631.10±3.96	3,229.09±67.41
5	5	4,081.64±27.42	-570.02±1.90	3,318.99±24.68

\* 고형연료 기준(수분 10%)으로 연료 사용 전 탈수 및 건조한 것으로 가정한 LHV

3.3. 공업분석

공업분석 결과는 표 8과 같으며, 표 7에서 관찰할 수 있듯이 공업분석 결과 수분함량이 높아 LHV 값이 낮게 나타났지만 폐목재 혼합비율 증가함에 따라 수분함량은 감소하였고, 회분, 휘발분, 고정탄소는 증가함을 보였다. 이는 상대적으로 하수슬러지의 높은 함수율과 폐목재의 낮은 함수율이 원인으로 판단되며, 공업분석의 4가지 분석항목 중 회분, 휘발분, 고정탄소도 수분보정

을 하여 계산하기 때문이다.

표 8. 공업분석 결과

No	혼합 비율(%)	수분(%)	회분(%)	휘발분(%)	고정탄소(%)
1	1	97.19	0.85	1.61	0.36
2	2	96.26	0.94	2.30	0.50
3	3	95.49	0.95	2.90	0.66
4	4	94.72	1.03	3.36	0.89
5	5	93.07	1.26	4.52	1.15

### 3.4. 유기물함량, 총부유물, pH 측정

분석결과는 표 9와 같으며, 폐목재 혼합량이 증가함에 따라 유기물함량, SS는 증가함을 보였고, pH도 증가함을 보였다. 이는 폐목재가 하수슬러지보다 높은 유기물함량(VS)을 보이기 때문으로 사료된다. 따라서 폐목재 혼합량이 증가하면 함수비가 낮아지는 효과도 있지만 유기물함량이 증가함으로 인해 발열량이 증가되는 것으로 판단된다.

표 9. VS/TS, SS, pH 측정 결과

No	혼합 비율(%)	VS/TS(%)	SS(mg/l)	pH
1	1	69.96	17,080	6.84
2	2	74.91	19,160	6.86
3	3	78.85	19,340	6.87
4	4	80.44	19,638	6.89
5	5	81.79	23,740	6.91

### 3.5. 원소분석

원소분석결과는 표 10과 같으며, 폐목재의 혼합량이 증가함에 따라 탄소와 수소는 증가함을 보였고, 질소, 황, 산소는 감소함을 보였다. 즉 폐목재 혼합량이 증가하므로 발열량이 높은 탄소와 수소가 증가하여 시료의 발열량이 향상되고 있음을 알 수 있다. 뿐만 아니라 폐목재 혼합량이 증가하면 NOX와 SOX 발생량이 낮아져 배출가스 처리가 용이해질 것으로 판단된다.

표 10. 화학적 원소분석 결과

No	혼합 비율(%)	N(%)	C(%)	H(%)	S(%)	O(%)
1	1	3.83±0.09	34.21±0.23	4.77±0.08	1.05±0.06	56.15±0.00
2	2	3.32±0.25	34.72±0.86	4.80±0.09	0.81±0.01	56.36±1.20
3	3	3.70±0.05	34.22±1.92	4.65±0.25	0.78±0.04	56.66±2.19
4	4	3.43±0.00	38.61±0.22	5.03±0.18	0.61±0.07	52.32±0.47
5	5	2.73±0.01	42.06±0.76	5.45±0.02	0.47±0.01	49.29±0.77

### 3.6. 통계적 해석

본 연구에서는 SPSS Version 18.0을 사용하여 통계학적 분석을 수행하였다. 폐목재 혼합율을 독립변수로 설정하며, CST와 고위발열량(HHV)을 종속변수로 설정하여 상관관계 분석을 하였다. 유의수준 0.05로 통계적 유의성을 판별하였고, 선형성을 확인하고자 하였다.

표 11에서처럼 폐목재 혼합 시 하수슬러지의 탈수성과 발열량이 향상됨을 보였고, 강한 선형관계를 보였다. 즉 폐목재 혼합 시 하수슬러지보다 탈수성과 발열량 모두 개선됨을 보였다. CST값은 상관계수 -0.912로 반비례 관계를 보였다. 이는 폐목재 혼합량이 증가함에 따라 탈수성이 개선됨을 의미한다. 고위발열량은 상관계수 0.948로 비례 관계를 보였다. 이는 폐목재 혼합량이 증가함에 따라 열량이 향상됨을 의미한다. 회귀분석 결과 모두 통계적으로 유의함을 보였고, 결정계수는 CST값이 0.832, 고위발열량이 0.898로 나타났다.

표 11. 폐목재 혼합비율에 따른 CST 및 고위발열량 회귀분석 결과

Y	X	선형 회귀방정식	R	R <sup>2</sup>	p-value
CST	폐목재 혼합비율	Y=-2.440X+86.180	-0.912	0.832	0.031
HHV	폐목재 혼합비율	Y=93.060X+3,618.770	0.948	0.898	0.014

## 4. 결론

본 연구에서는 하수슬러지에 폐목재를 혼합하여 폐목재의 여과보조제와 열량보조제로서의 가능성을 확인하기 위한 기초데이터를 확보하고, 통계적 해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 하수슬러지에 폐목재 혼합량이 증가함에 따라 탈수성은 향상되었고, 혼합율이 최대일 때 최고의 좋은 탈수성을 보였다.
2. 폐목재 혼합량이 증가함에 따라 발열량은 증가함을 보였고, 혼합율이 최대일 때 발열량이 가장 높았음이 확인되었다.
3. 폐목재 혼합량이 증가하므로 발열량이 높은 탄소 등이 증가하여 시료의 발열량이 향상되고 있음을 알 수 있었고, 질소와 황은 감소하여 NOX와 SOX 발생량이 낮아져 배출가스 처리가 용이해질 것으로 판단된다.

4. 본 연구에서는 하수슬러지를 연료화할 경우 폐목재의 여과보조제와 열량보조제로 가능성을 확인하였으며, 향후 혼합량 조절을 통한 시료별로 탈수성과 발열량이 개선되는 최적 혼합율을 도출한다면 하수슬러지의 연료로서 가치를 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

## Reference

1. 한국상하수도협회, 2004, “하수슬러지 처리방안”, 국가환경산업기술정보시스템.
2. 환경부, 2016, “2016 하수도 통계”, 국가하수도정보시스템.
3. 환경부, 2012, “폐목재 재활용제도 선진화 방안 마련 연구”.
4. 한국환경산업기술원, 2014, “하수슬러지 처리 및 연료화 기술동향”.
5. 한국환경산업기술원, 2016, “하수슬러지의 에너지화 기술동향”.
6. 엄형춘, 황선진, (2003), “하수슬러지 탈수성 개선을 위한 과산화수소 산화처리와 제지슬러지 혼합 탈수에 관한 연구”, 한국폐기물자원순환학회, 2003(1), pp166-169.
7. 조정원, 조준형, 윤미영, 장정은, (2003), “CST장치를 이용한 제지 슬러지 탈수에 관한 연구”, 한국 펄프·종이공학회, 추계학술발표논문집, pp345-352.
8. 엄형춘, 2004, “제지슬러지 혼합탈수에 의한 하수슬러지 탈수성 개선에 관한 연구”, 경희대학교 대학원 석사학위논문.
9. O. Sawalha & M. Scholz ,(2007), “Assessment of Capillary Suction Time (CST) Test Methodologies”, Environmental Technology, 28(12), pp1377-1386.
10. 환경부, 2014 개정, “고형연료제품 품질 시험·분석방법”.
11. 환경부, 2016 개정, “폐기물공정시험기준”.

논문투고일 2019년 5월 30일  
 논문심사일 2019년 6월 10일  
 논문게제일 2019년 6월 30일