

하수슬러지와 생활폐기물 혼합소각시 하수슬러지 정량공급에 관한 연구(II) - 실증플랜트 중심으로

A study on Quantitative Supply of Sewage Sludge for Co-Incineration of Municipal Solid Waste and Sewage Sludge(II) - Based on Actual Incineration Plant

조재범[†] · 김우구 · 장 훈

Jae-Beom Cho[†] · Woo-Gu Kim · Hoon Jang

태영건설 기업부설연구소

Taeyoung Engineering & Construction, Seoul, Korea

(2013년 2월 1일 접수, 2013년 12월 13일 채택)

Abstract : In this study, operation data from an actual plant in M city were analyzed to evaluate effects of water supply into sewage sludge on the co-incineration of municipal solid waste (MSW) and sewage sludge. Design capacity of the stoker incinerator is 50 m³/day. Maximum portion of sewage sludge in the total waste input was 20%. According to this research, moisture content increase up to 85% of sewage sludge could be possible by water supply on MSW input to the incinerator. Therefore, stable operation of incinerator could be achieved. As water was added into sewage sludge up to 85%, input quantity of sewage sludge to frequency (Hz) was similar to theoretical input. Also, it is concluded that stable management of incinerator without leachate combustion and damages of refractory bricks and castable could be achieved by the reduction of low heating value.

Key Words : Co-incineration, Sewage Sludge, Municipal Solid Waste, Frequency (Hz)

요약 : 본 연구에서는 하수슬러지 처분대안으로서 하수슬러지를 생활폐기물과 혼합소각시 안정적 소각로 운전을 위한 하수슬러지의 정량공급방안에 대하여 실증플랜트를 중심으로 고찰하고자 하수슬러지의 원활한 공급방안으로 이송배관에 수분을 공급 하는 경우와 공급하지 않는 경우, 공급 모노펌프의 인버터 조절(Hz)에 따라 하수슬러지 정량공급 여부를 측정하고자 한다. 실험결과, 함수율 85%에서 인버터 조절(Hz)에 따른 이론적 슬러지 공급량과 일치하는 것으로 나타나 소각시설의 안정적 운영이 가능할 것으로 판단된다.

주제어 : 혼합소각, 하수슬러지, 생활폐기물, 주파수

1. 서론

폐기물 관리법¹⁾에서는 수질 및 수생태계 보전에 관한 법률에 규정된 폐수종말처리시설 및 하수도법에 규정된 하수종말처리시설과 1일 폐수배출량 2,000 m³ 이상인 배출업소의 유기성슬러지는 직매립 해서는 안 되며, 소각하거나 시멘트·합성고분자 화합물의 이용, 기타 이와 유사한 방법으로 고형화하거나 생물학적 처분방법으로 처분하여 퇴비로 사용하거나, 환경부 장관이 정하여 고시하는 용도 및 방법에 따라 매립시설 복토용 및 토지개량제 등으로 사용토록 되어 있다.

2010년을 기준으로 하수슬러지는 하루 약 9,000톤이 발생되고 있으며, 계속적으로 증가하고 있는 추세이다. 국내의 경우 2003년 7월 1일부터 하수슬러지 직매립 전면 금지 및 2011년 런던협약 '96의정서 발효에 따라 2012년(현재 유예기간 부여)부터 해양투기가 전면금지가 되면서 하수슬러지의 안정적 처분에 대한 대책이 시급한 상황이다.²⁾

현재 하수슬러지 처분방법의 경우, 각 지자체에서 대부분 해양투기와 같은 단순처분 방법으로 처분하고 있으나 2012

년부터 유기성슬러지류의 해양투기가 금지될 경우, 현재 폐기물 소각시설에서 하수슬러지를 혼합소각하고 있는 부산 해운대, 김해 장유, 경북 상주, 경남 통영, 인천국제공항 등을 제외하고 이에 대한 대책방안이 미비한 실정이다.³⁾

해양투기 처분비용은 평균 29,000원/톤으로 소각(55,000원/톤), 매립(35,000원/톤), 재활용(50,000원/톤)보다 저렴하나 해양오염이라는 2차적 환경오염을 유발하는 단점⁴⁾을 지니고 있다. 또한 슬러지 전용 소각처분의 경우, 신규 소각로 건설에 따른 비용부담이 커서 각 지자체는 기존 운영중인 생활폐기물 소각로에서 처분하는 방안에 대해 면밀히 검토하고 있다.

생활폐기물과 하수슬러지 혼합소각에 관한 연구는 2001년 배⁵⁾의 “도시쓰레기와 하수슬러지의 혼합소각기술”을 필두로 2004년 장⁶⁾의 “건설 하수슬러지와 생활폐기물 혼합소각이 소각에 미치는 영향에 관한 연구”, 허⁷⁾의 “국내 생활폐기물과 하수슬러지의 혼합 압축 열분해 특성”, 2007년 박⁸⁾의 “스토커식 소각로에서 생활폐기물과 하수슬러지 혼합소각의 운영현황 분석”, 2009년 김⁹⁾의 “기존 생활폐기물 소각시설 여유용량을 이용한 하수슬러지 처리방안 연구”, 2010

[†] Corresponding author E-mail: pcncjb@taeyoung.com Tel: 031-910-6915 Fax: 031-910-6971

년 양¹⁰⁾의 “로타리킬른을 이용한 하수슬러지와 사업장폐기물의 혼합소각 실증연구” 등 하수슬러지 혼합소각에 관한 연구가 활발히 진행 중에 있다. 그러나 많은 연구자에 의한 하수슬러지의 혼합소각에 대한 연구에도 불구하고 실증소각 플랜트에서는 제대로 적용되지 못하고 있으며 정량적으로 소각이 이루어지지 않고 있다. 소각로의 로내온도를 850~950℃로 적정유지하고 정량적 소각을 달성하기 위해서는 하수슬러지의 정량공급방법이 매우 중요한 변수이다.¹¹⁾ 하수슬러지의 정량공급이 이루어지지 않아 소각로 운전변수가 수시로 변하는 상황에서 완전연소가 이루어지지 않으면 소각로 적정 로내온도 제어가 어렵고 미연분이 다량 발생할 수 있어 폐기물관리법상에 규정되어 있는 바닥재의 강열감량 5% 이하를 만족하기 어렵다.¹²⁾ 이에 본 연구에서는 하수슬러지 처분대안으로서 하수슬러지를 생활폐기물과 혼합소각시 안정적 소각로 운전을 위한 하수슬러지의 정량공급방안에 대하여 실증플랜트를 중심으로 고찰하고자 하였다. 이를 위해 하수슬러지의 원활한 공급방안으로 이송배관에 수분을 공급 하는 경우와 공급하지 않는 경우, 그리고 공급 모노펌프의 인버터 조절(Hz)에 따라 하수슬러지 정량공급 여부를 측정하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 실험재료

본 연구에 사용된 하수슬러지는 D시 하수종말처리장에서 발생하는 시료를 이용하였으며 평균 수분함량은 78.8%, 회분이 15.29%, 가연분은 5.91%로 각각 나타났다. 원소조성 결과 C 2.80%, H 0.98%, N 0.25%, S 0.18%, O 1.95%로 각각 나타나 아래 식 (1), Dulong Equation(식 (1))¹³⁾을 이용한 저위발열량(LHV, Low Heating Value)은 58 kcal/kg으로 나타났다.

$$LHV(kcal/kg) = 8100C + 34000(H-O/8) + 2500S - 600(9H+W) \quad (1)$$

여기서, C, H, O, S : 가연성생활쓰레기 중 탄소, 수소, 산소, 황 분율

2.2. 실험방법

생활폐기물과 하수슬러지 혼합소각시 가장 중요한 인자는 스톡소각로에 하수슬러지를 얼마만큼 정량적으로 공급해 줄 수 있느냐는 점이다. 하수슬러지의 정량공급은 혼합소각시 소각로 운전조건 변화를 최소화 할 수 있다.¹⁴⁾ 하수슬러지가 정량적으로 공급이 되지 않으면, 1차/2차 공기공급

Table 1. Capacity of incinerator in M city

Items	High quality	Base quality	Low quality
Quantity	50 ton/day	55 ton/day	50 ton/day
Materials	MSW (45) + sludge (5)	MSW (50) +sludge (5)	MSW (45) + sludge (5)
Low heat value (kcal/kg)	2,190	1,550	1,050

MSW : Municipal Solid Waste

및 로내온도 조절, 생활폐기물 투입량 등의 운전조건 변화가 발생하여 안정적 소각로 운전이 어렵게 된다. 생활폐기물 소각시설에서의 하수슬러지 혼합소각 지침¹⁵⁾에 의하면 생활폐기물과 하수슬러지(탈수케이 : 함수율 80% 내외) 혼합비율을 10% 이내로 규정하고 있지만 정량공급이 가능하다면 15%, 20%까지도 증가시킬 수 있다.

본 연구에서는 하수슬러지의 정량공급을 유도하기 위한 인자를 도출하고자 하였다. 정량공급을 가능토록 하는 지표 인자는 하수슬러지의 수분함량에 따른 점착구간, 하수슬러지 고화현상이다. 이를 위해 M시 소각시설 하수슬러지 공급배관에 수분을 공급할 수 있는 설비를 설치하였다. 투입관 입구 1개소, 중간부분 2개소, hopper 유출구 1개소에 수분공급이 가능토록 하여 각 구간별 슬러지 온도분포 및 수분함량을 측정하였으며 하수슬러지 공급펌프(모노펌프, 처리용량 0.5 m³/hr × 5 kg/cm²·G, 직경 100 A) 인버터 주파수(Hz)당 소각로에 투입되는 하수슬러지량을 측정하였다. 또한, 수분 공급에 따른 소각로 열부하를 측정함으로써 소각로의 안정적 운전 여부를 관찰하였다. 실증테스트를 위해 사용된 소각시설 제원은 Table 1에 나타난 바와 같다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 하수슬러지 투입관 온도분포

수분공급 유무에 따른 하수슬러지 투입관 내 하수슬러지 온도분포의 경우, 측정구간별로 온도가 증가하는 경향을 나타내었는데 이는 소각로의 열이 하수슬러지 이송관 내로 열 전달 되었기 때문으로 판단된다. 온도가 상승되는 현상은 하수슬러지의 이송관내 점착현상을 유발할 수 있다. 이는 Table 2와 식 (2)에 나타난 바와 같이 하수슬러지 내의 칼슘성분과 모래 그리고 수분이 결합하여 C-S-H수화물을 형성하고 식 (3)에 나타난 바와 같이 C₃A (Tricalcium Aluminate)가 생성되기 때문이다.¹⁶⁾ 또한, 하수슬러지의 경우 SO₃를 1.02% 포함하고 있어 석고의 존재를 확인할 수 있었으며 이는 티모모라이트와 에트링가이트¹⁷⁾와 같은 C-S-H 수화물을 형성하여 주입관의 폐색현상을 유발하는 주원인이 되기 때문에 소각로내로의 정량공급이 어렵게 된다. 뿐만 아

Table 2. XRR analysis of sewage sludge

Items	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	TiO ₂	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	Organic matter	Total
%	9.78	22.4	10.2	4.25	1.24	1.27	0.42	1.02	4.92	1.02	43.26	99.78

Table 3. Temperature distribution of input sewage sludge in accordance with w/ and w/o water supply

Items	Measurement point	Measurement frequency			Mean temp. (°C)
		1 st (°C)	2 nd (°C)	3 rd (°C)	
Without water supply	1 m (1 m section from hopper)	26,7	26,4	26,0	26,4
	10 m (10 m section from hopper)	26,8	26,6	26,4	26,6
	20 m (20 m section from hopper)	27,4	27,4	27,1	27,3
	30 m (incinerator input hole)	31,4	32,0	31,4	31,6
With water supply	1 m (1 m section from hopper)	26,0	26,1	26,2	26,1
	10 m (10 m section from hopper)	26,1	26,2	26,4	26,2
	20 m (20 m section from hopper)	26,3	26,5	27,1	26,6
	30 m (incinerator input hole)	28,9	28,5	28,4	28,6

나라 소각로 가동중지시 하수슬러지 이송관 내에 남아있는 하수슬러지가 고화될 가능성이 있어 소각로 가동중지시 주의를 요한다. 따라서 이러한 현상을 방지하기 위해서는 소각로 내 열부하의 감소폭이 크지 않은 범위 내에서 하수슬러지의 수분함량을 85%정도로 유지될 수 있도록 하여 하수슬러지의 정량공급이 가능토록 수분공급설비의 설치가 필요할 것으로 판단된다.



수분공급 유무에 따른 하수슬러지 온도분포 결과 Table 3에 나타난 바와 같이 수분공급이 없는 경우보다는 수분공급이 있는 경우에 온도상승이 감소한 것을 알 수 있다.

하수슬러지 온도는 이송관 표면온도를 적외선 온도계로 측정(이송관로 내에 있는 하수슬러지 실측온도는 아님)하였다.

3.2. 투입 하수슬러지 수분분포

투입 하수슬러지의 수분분포를 살펴보면, 수분공급설비가 설치되지 않은 하수슬러지 이송관 내 하수슬러지의 수분함

Table 4. Water content distribution of input sewage sludge in accordance with w/ and w/o water supply

Items	Measurement	Measurement frequency			Mean temp. (%)
		1 st (%)	2 nd (%)	3 rd (%)	
Without water supply	1 m (1 m section from hopper)	78,9	79,0	79,2	79,0
	10 m (10 m section from hopper)	79,2	79,1	79,2	79,2
	20 m (20 m section from hopper)	79,1	79,2	79,1	79,1
	30 m (incinerator input hole)	79,2	79,3	79,1	79,2
With water supply	1 m (1 m section from hopper)	78,9	79,4	78,8	79,0
	10 m (10 m section from hopper)	83,1	84,0	83,6	83,6
	20 m (20 m section from hopper)	83,9	83,7	83,9	83,8
	30 m (incinerator input hole)	84,6	84,3	83,9	84,2

량은 약 79% 정도로 일정하였으며 수분함량 85%를 유지하도록 운영되는 수분공급설비가 설치된 하수슬러지의 수분함량은 평균 84%를 나타내었다.

3.3. 인버터 공급 Hz당 하수슬러지 정량공급

이론적 및 실질적 하수슬러지 정량 공급량 확인을 위한 사용변수는 Table 5에 나타내었다.

이론적 인버터 공급 주파수(Hz)당 하수슬러지 정량공급 계산결과, Table 6에 나타난 바와 같이 생활폐기물의 10% (5톤/일)의 하수슬러지를 정량 주입할 수 있는 주파수는 28 Hz로 나타났고 15% (7.5톤/일)는 42 Hz, 20% (10톤/일)는 55~56 Hz로 각각 나타났다. 실질플랜트에서 실제 인버터 공급 주파수(Hz)당 하수슬러지 정량공급 측정 결과, Table 7

Table 5. Parameters for the validation of supply quantity of sewage sludge

Items	Size (mm)	Reference
Rotary eccentric (e)	6	
Rotary diameter (d)	30	
Stator pitch (s)	150	
Pump rotational frequency (n)	-	Motor reduction ratio/1,375
Specific gravity	0,9	

Table 6. Supply quantity of sewage sludge (water content 80%) to theoretical frequency (Hz)

Frequency (Hz)	Motor (rpm)	Reduction (rpm)	Pump (rpm)	Quantity (m ³ /hr)	Quantity (m ³ /day)	Quantity (ton/d)
20	600	35,29	25,67	0,1663	4,0	3,6
22	660	38,82	28,24	0,1830	4,4	4,0
25	750	44,12	32,09	0,2079	5,0	4,5
27	810	47,65	34,65	0,2245	5,4	4,9
28	840	49,41	35,94	0,2329	5,6	5,0
29	870	51,18	37,22	0,2412	5,8	5,2
30	900	52,94	38,50	0,2495	6,0	5,4
34	1,020	60,00	43,64	0,2828	6,8	6,1
35	1,050	61,76	44,92	0,2911	7,0	6,3
40	1,200	70,59	51,34	0,3327	8,0	7,2
41	1,230	72,35	52,62	0,3410	8,2	7,4
42	1,260	74,12	53,90	0,3493	8,4	7,5
43	1,290	75,88	55,19	0,3576	8,6	7,7
44	1,320	77,65	56,47	0,3659	8,8	7,9
48	1,440	84,71	61,60	0,3992	9,6	8,6
49	1,470	86,47	62,89	0,4075	9,8	8,8
53	1,590	93,53	68,02	0,4408	10,6	9,5
54	1,620	95,29	69,30	0,4491	10,8	9,7
55	1,650	97,06	70,59	0,4574	11,0	9,9
56	1,680	98,82	71,87	0,4657	11,2	10,1
57	1,710	100,59	73,16	0,4740	11,4	10,2
60	1,800	105,88	77,01	0,4990	12,0	10,8

Table 7. Supply quantity of sewage sludge to actual inverter frequency (Hz) (w/o water supply : water content 80%)

Frequency (Hz)	Theoretical Q. (t/d)	Actual Q. (t/d)
25	4,50	3,05
27	4,90	4,29
28	5,00	3,48
29	5,20	4,64
40	7,20	6,80
41	7,40	6,19
42	7,50	6,56
43	7,70	7,16
54	9,70	7,82
55	9,90	9,02
56	10,10	8,40
57	10,20	8,95
58	10,40	9,20

Table 8. Supply quantity of sewage sludge to actual inverter frequency (Hz) (w/o water supply : water content 85%)

Frequency (Hz)	Theoretical Q. (t/d)	Actual Q. (t/d)
25	4,50	3,86
27	4,90	4,86
28	5,00	5,07
29	5,20	5,21
40	7,20	7,44
41	7,40	7,53
42	7,50	7,58
43	7,70	7,61
54	9,70	9,68
55	9,90	9,89
56	10,10	10,12
57	10,20	10,24
58	10,40	10,64

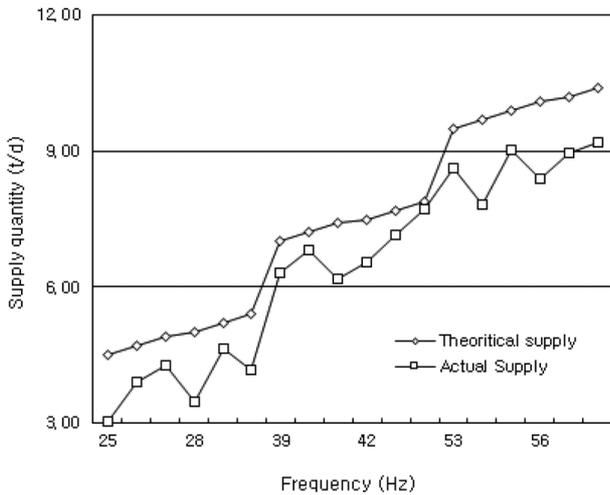


Fig. 1. Supply quantity of sewage sludge to actual inverter frequency (Hz) (w/o water supply : water content 80%).

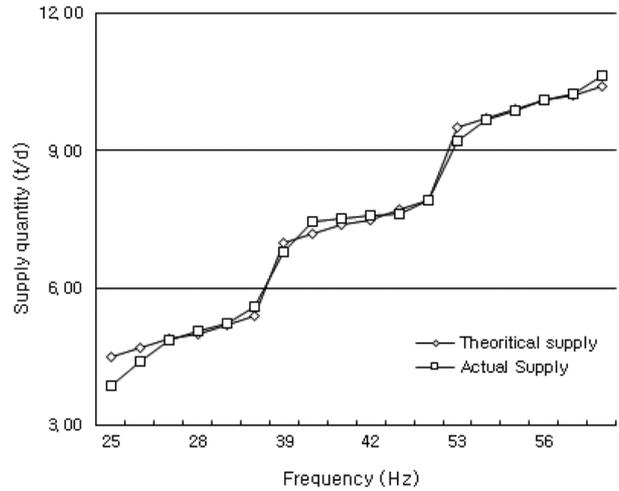


Fig. 2. Supply quantity of sewage sludge to actual inverter frequency (Hz) (w/o water supply : water content 85%).

과 Fig. 1에 나타난 바와 같이 수분공급이 되지 않은 경우, 생활폐기물의 10% (5톤/일)의 하수슬러지 정량공급이 가능한 이론적 주파수 28 Hz에서 실제 하수슬러지 공급량이 3.48톤/일로 나타나 이론값과 31.3%의 차이를 나타냈다. 15% (7.5톤/일) 정량공급이 가능한 이론적 주파수 42 Hz에서 6.56톤/일, 20% (10톤/일) 정량공급이 가능한 이론적 주파수 55~56 Hz에서 8.40~9.02톤/일로 각각 나타나 이론값과 상당한 차이를 나타내었다.

한편, 수분이 공급되어 하수슬러지의 수분함량이 85% 정도를 유지하는 경우, Table 8과 Fig. 2에 나타난 바와 같이 수분이 공급되지 않은 경우와 다른 경향을 나타내었다. 28 Hz에서 5.07톤/일, 42 Hz에서 7.58톤/일, 55~56 Hz에서 9.89~10.12톤/일의 공급량을 나타내어 이론값과 상당히 유사한 공급유량을 나타내었다.

위의 결과를 토대로 소각시설의 안정적 운영을 위해서는 하수슬러지에 수분을 공급할 수 있는 공급장치 설치가 필요할 것으로 판단된다.

3.4. 수분공급에 따른 소각로 저위발열량 변화

M시의 생활폐기물과 하수슬러지(함수율 85% 유지) 혼합소각 실증 Plant에서의 정확한 저위발열량을 측정하기 위하여 소각로 열수지(Heat Balance)를 실시하였다. 입열과 출열을 통하여 계산된 저위발열량은 Table 12에 나타난 바와 같이 Bomb 열량계로 측정된 저위발열량과 비교시 다소 차이가 나는 것으로 나타났다. 이는 Bomb 열량계로 측정된 저위발열량의 경우, 반입된 생활폐기물과 하수슬러지 혼합폐기물을 혼합소각시 침출수 소각량, 요소수 분사량, 바닥재 중 미연탄분 등을 고려하지 않은 상태에서 측정된 저위발열량이고 열수지(Heat Balance)를 통한 저위발열량 측정은 현장에서 여러 가지 변수들을 모두 고려하여 측정된 저위발열량이기 때문에 판단된다. 이상적인 조건에서 측정된 저위발열량 보다 여러 가지 변수들을 모두 고려한 실증 Plant에서 측정된 저위발열량이 낮게 나타난다. Table 11에 열수지(Heat Balance)를 이용한 저위발열량 측정시 사용한 변수와 저위발열량 측정시 현장에서 측정된 변수를 나타내었다.

Table 9. Parameters using heat balance

Items	Content	Value
Input heat	C_{pw} Specific heat under constant pressure on waste (kcal /kg · °C)	1,000
	C_{pc} Specific heat under constant pressure on combustible material (kcal /kg · °C)	0,510
	C_{ph} Specific heat under constant pressure on ash (kcal /kg · °C)	0,200
	C_{pa} Specific heat under constant pressure on air (kcal /kg · °C)	0,312
	T_a Injection air temperature (°C)	25
	C_c Specific heat under constant pressure on leachate (kcal /kg · °C)	1,000
	T_c Leachate injection temperature (°C)	25
	T_r Waste temperature (°C)	25
	C_{pca} Specific heat under constant pressure on combustion gas (kcal /kg · °C)	0,360
	S_{ba} Steam (kg/hr)	5,000
Output heat	S_e Steam enthalpy (kcal/hr)	686,3
	H_u Heating value on net carbon (kcal/kg)	8,160
	C_{pas} Specific heat under constant pressure on bottom ash (kcal /kg · °C)	0,227
	T_{as} Output temperature on ash (°C)	300

생활폐기물과 하수슬러지를 각각 10%, 15%, 20% 혼합한 DWSS-10, DWSS-15, DWSS-20의 입열은 혼합폐기물 보유현열과 연소열, 1차, 2차, 냉각 공기량, 침출수 현열로 구분하였고 출열은 연소가스 지출열, 혼소폐기물 승온열, 보일러 손실열, 재손실열, 침출수 기화열로 구분하였다. 입열 중 혼합폐기물 보유현열 계산은 혼합폐기물 온도가 날씨와 계절에 따라 다르게 나타지만 1년의 평균치인 상온(25°C)으로 계산하였고 연소열 계산은 50톤/일 용량의 M시 소각시설의

Table 10. Parameters measured at actual site (M-city incinerator) as low heating value measurements

Leachate (kg/hr)	Steam (ton/hr)	Incombustible carbon (kg/hr)	Bottom ash (kg/hr)	Fly ash (kg/hr)	Outlet temp. (°C)	Wet combustible gas (Sm ³ /hr)	Air (Nm ³ /hr)
400	4,28	0,921	300	35	972	13,998	5,125
320	4,34	1,004	327	39	961	12,889	5,617
300	4,78	1,013	330	40	953	12,654	5,688
289	4,89	1,025	334	42	952	12,055	5,784
410	4,36	0,887	289	34	972	13,958	5,024
350	4,35	0,927	302	38	968	12,465	5,600
330	4,68	0,985	321	41	960	12,004	5,687
315	4,88	0,989	322	42	958	11,952	5,800
408	4,28	0,903	294	36	975	13,997	5,125
320	4,24	0,958	312	39	962	13,254	5,584
280	4,58	0,973	317	40	958	12,125	5,697
270	4,91	0,982	320	43	953	11,958	5,810

조건에 맞추어 총출열에서 보유현열, 공기열, 침출수 현열을 빼고 시간당 소각 가능한 2.0833톤/hr으로 나누어 계산하였다.

공기열 계산은 1차공기와 2차공기 그리고 냉각공기의 총합을 적용하여 계산하였고 침출수 현열은 M시 소각시설에서 실질적으로 발열량을 낮추기 위해 주입되는 시간당 침출수량을 구하여 산출하였다.

출열의 경우, 연소가스 지출열은 보일러 후단부에서 대기 오염물질 시료채취시 측정된 유량을 적용하여 계산하였고 승온열은 혼합폐기물이 승온되는 온도 평균 200°C를 적용하여 산출하였다. 보일러 손실열은 연소가스 지출열의 5%를 적용하여 계산하였고 재손실열 계산은 미연탄소분을 바닥재의 3.07%(열작감량 기준)로 산정하여 계산하였다. 또한

Table 11. Low heating value on heat balance

Items	Samples	Sensible heat on waste (Mcal/hr)	Combustion heat (Mcal/hr)	Air heat (Mcal/hr)	Sensible heat on leachate (Mcal/hr)	LHV (kcal/kg)	Total
1 st	MSW	34,14	5,490,82	39,98	10,00	2,636	5,574,93
	DWSS-10	34,60	4,987,13	43,81	8,00	2,394	5,073,54
	DWSS-15	35,74	4,851,87	44,37	7,50	2,329	4,939,48
	DWSS-20	36,97	4,624,41	45,12	7,23	2,220	4,713,72
2 nd	MSW	33,47	5,481,63	39,19	10,25	2,631	5,564,53
	DWSS-10	34,10	4,879,75	43,68	8,75	2,342	4,966,28
	DWSS-15	36,03	4,663,85	44,36	8,25	2,239	4,752,49
Input heat	DWSS-20	35,60	4,627,94	45,24	7,88	2,221	4,716,66
	MSW	34,20	5,509,88	39,98	10,20	2,645	5,594,26
	3 rd	DWSS-10	35,54	5,122,65	43,56	8,00	2,459
DWSS-15		36,12	4,672,28	44,44	7,00	2,243	4,759,84
DWSS-20		36,02	4,583,77	45,32	6,75	2,200	4,671,86
Mean	MSW	33,94	5,494,11	39,71	10,15	2,637	5,577,91
	DWSS-10	34,74	4,996,51	43,68	8,25	2,398	5,083,19
	DWSS-15	35,96	4,729,33	44,39	7,58	2,270	4,817,27
	DWSS-20	36,19	4,612,04	45,22	7,28	2,214	4,700,75

Table 11. Continued

Items	Samples	Combustion gas (Mcal/hr)	Rising (Mcal/hr)	Boiler loss (Mcal/hr)	Ash loss (Mcal/hr)	Leachate evaporation (Mcal/hr)	Total (Mcal/hr)	
Output heat	MSW	4,898.18	185.93	244.91	30.31	215.60	5,359.33	
	1 st	DWSS-10	4,459.08	185.93	222.95	33.09	172.48	4,901.06
		DWSS-15	4,341.33	185.93	217.07	33.44	161.70	4,777.78
		DWSS-20	4,131.49	185.93	206.57	33.95	155.77	4,557.95
	2 nd	MSW	4,884.18	185.93	244.21	29.22	220.99	5,343.54
		DWSS-10	4,343.80	185.93	217.19	30.70	188.65	4,777.63
		DWSS-15	4,148.58	185.93	207.43	32.67	177.87	4,574.62
	3 rd	DWSS-20	4,122.01	185.93	206.10	32.83	169.79	4,546.87
		MSW	4,912.95	185.93	245.65	29.82	219.91	5,374.35
		DWSS-10	4,590.13	185.93	229.51	31.70	172.48	5,037.26
	Mean	DWSS-15	4,181.67	185.93	209.08	32.23	150.92	4,608.92
		DWSS-20	4,102.55	185.93	205.13	32.71	145.53	4,526.33
MSW		4,898.44	185.93	244.92	29.78	218.83	5,359.07	
Mean	DWSS-10	4,464.34	185.93	223.22	31.83	177.87	4,905.32	
	DWSS-15	4,223.86	185.93	211.19	32.78	163.50	4,653.77	
	DWSS-20	4,118.68	185.93	205.93	33.17	157.03	4,543.72	

침출수 기화열은 투입된 침출수가 기화될 때의 엔탈피(539 kcal/hr)를 적용하여 계산하였다.

열수지 통한 저위발열량 측정결과, 생활폐기물의 저위발열량은 2,637 kcal/kg으로 나타났고 DWSS-10, DWSS-15, DWSS-20의 저위발열량은 2,398 kcal/kg, 2,270 kcal/kg, 2,214 kcal/kg로 각각 나타났다. Bomb 열량계로 측정된 MSW, DWSS-10, DWSS-15, DWSS-20의 저위발열량 2,813 kcal/kg, 2,568 kcal/kg, 2,587 kcal/kg, 2,251 kcal/kg과 비교시 낮게 나타났는데 이는 위에서 서술한 바와 같이 소각로 안정적

Table 12. Comparisons of low heating value in accordance with mixed incineration of municipal solid waste and sewage sludge

items	Theoretical (kcal/kg)	Bomb (kcal/kg)	Actual (kcal/kg)	
MSW	1 st	2,813	2,813	2,636
	2 nd	2,705	2,705	2,583
	3 rd	2,924	2,924	2,644
	Mean	2,814	2,814	2,621
DWSS-10	1 st	2,498	2,694	2,422
	2 nd	2,550	2,375	2,399
	3 rd	2,715	2,592	2,607
	Mean	2,588	2,554	2,476
DWSS-15	1 st	2,363	2,548	2,290
	2 nd	2,412	2,245	2,271
	3 rd	2,568	2,451	2,467
	Mean	2,448	2,415	2,343
DWSS-20	1 st	2,228	2,402	2,157
	2 nd	2,275	2,115	2,142
	3 rd	2,420	2,310	2,326
	Mean	2,308	2,276	2,208

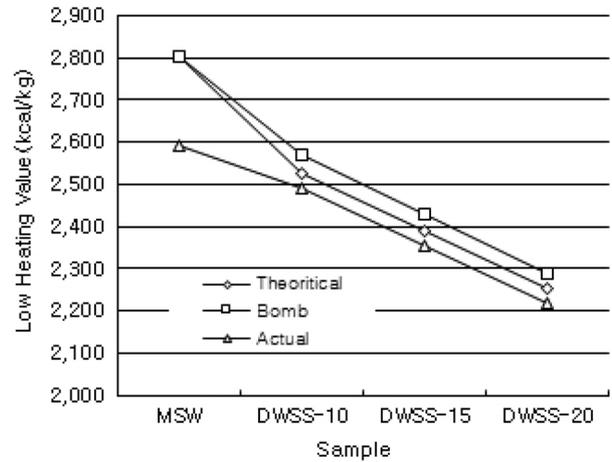


Fig. 3. Comparisons of low heating value in accordance with mixed incineration of municipal solid waste and sewage sludge.

운전(발열량 감소)상 투입되는 침출수량과 요소수량 등 현장조건에서의 여러 가지 변수가 적용되지 않았기 때문으로 판단된다.

위의 결과를 토대로 종합해보면, 생활폐기물에 하수슬러지를 10%, 15%, 20% 혼합소각할 경우, 열적부하가 줄어들기 때문에 현재 고발열 생활폐기물에 의한 클링커생성에 의한 내화벽돌 및 케스터블 파손 등과 같은 문제를 해결할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

하수슬러지를 생활폐기물과 혼합소각할 때 하수슬러지 정량공급을 위한 수분공급과 공급펌프의 인버터 주파수 및 소

각로 열부하 측정 결과 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 하수슬러지 이송관 내로 수분을 공급하여 하수슬러지의 함수율을 약 85%로 유지할 경우 이송관 측정구간별 온도분포가 수분을 공급하지 않은 경우보다 낮게 나타나 소각로 내부열에 의한 하수슬러지의 경화현상으로 인한 슬러지 이송에 문제가 없는 것으로 나타나 생활폐기물과 하수슬러지 혼합소각시 소각로내로의 정량공급이 가능함을 알 수 있었다.

2) 수분공급 유무에 따른 공급펌프 인버터 주파수 당 하수슬러지의 정량공급량을 측정한 결과, 수분을 공급하지 않았을 경우 정량공급이 불가능하였으며 수분을 공급하였을 경우, 이론적 인버터 공급주파수 당 정량공급이 가능함을 알 수 있어 소각로의 안정적 운전이 가능함을 알 수 있었다.

3) 수분공급에 따른 소각로내 저위발열량을 토대로 검토한 결과, 하수슬러지에 수분을 공급하여 약 85%의 함수율을 유지한 경우 열부하가 감소하여 고발열량 생활폐기물 유입에 따른 클링커생성으로 인한 내화벽돌 및 케스터블 파손을 사전에 방지할 수 있을 것으로 판단된다.

KSEE

참고문헌

1. Ministry of Environment, "Waste Management Law," (2012).
2. Kim G. S., "Reduction and Reuse of Sewage Sludge," *J. Environ. Hi-technol.*, **6**(7), 10~17(1998).
3. Ministry of Environment, "Guide line of Co-incineration Municipal Solid Waste and Sewage Sludge," pp. 1~3(2007).
4. KAIST, "Development of Grate and supply device for co-incineration of industrial waste," pp. 17~20(2002).
5. Bae, S. K., "Co-incineration Municipal Solid Waste and Sewage Sludge," *J. Kor. Solid Wastes Eng. Soc.*, **18**(3), 39~48 (2001).
6. Jang, J. C., "A Study on Effect of Incineration to Mixed Incineration of Dry Sewage Sludge and Living Waste," *J. Kor. Soc. Waste Manage.*, **3**(2), 61~70(2004).
7. Heo, K. S., "A study on the characteristics of compression and pyrolysis of MSW blended with sewage sludge," Busan National University Master Thesis,(2004).
8. Park, K. H., "Analysis of Operation as Co-incineration MSW and Sewage Sludge at Stoker incinerator," *J. Kor. Solid Wastes Eng. Soc. Proc.*, pp. 697~700(2007).
9. Kim, J. H., "A Study on Sewage Sludge Treatment using Spare Capacity of Existing Municipal Waste Incinerator Disposal Facilities," Hanyang University Master Thesis,(2009).
10. Yang, D. J., "An Empirical Study on Co-incineration of Sewage sludge and Industrial waste using the Rotary Kiln Incinerator," Korea Polytechnic University p.H.D Thesis,(2010).
11. Seo, Y. C., "Industrial Waste Treatment," DongHwa Technology Publishing Co., pp. 15~18(2000).
12. Ministry of Environment, "Waste Management Law enforcement regulations," (2012).
13. Ministry of Environment, "Development of Grate and supply device for co-incineration of industrial waste," pp. 184~186 (2006).
14. Jung, J. S. and Chin, S. M., "Study on co-incineration of Municipal Solid Waste and Organic Sludge" KOSCO Symposium, pp. 238~244(2005).
15. Ministry of Environment, "Guide line of Co-incineration Municipal Solid Waste and Sewage Sludge," p. 2(2007).
16. Werther, J. and Ogada, T. "Sewage sludge combustion," *Prog. Energy Combust. Sci.*, **25**, 55~90(1999).
17. Bensted, J. and Barnes, P., Structure and Performance of Cements, Spon Press, p. 50(2002).