

하수슬러지와 생활폐기물 혼합소각시 하수슬러지 정량공급에 관한 연구 - Batch Test 중심으로

A Study on Quantitative Supply of Sewage Sludge for Co-Incineration of Municipal Solid Waste and Sewage Sludge

조재범[†] · 김우구 · 연경호 · 신정훈

Jae-Beom Cho[†] · Woo-Gu Kim · Kyeong-Ho Yeon · Jung-Hun Shin

(주)태영건설 기업부설연구소

Taeyoung Engineering & Construction, Seoul, Korea

(2012년 9월 24일 접수, 2013년 1월 30일 채택)

Abstract : The various promotion countermeasures such as solidification, carbonization, and the creation of cement materials have been considered to existing treatment methods such as incineration and the creation of composts, since direct landfill was prohibited for encouraging the recycling based on the sludge treatment on land. The Main objective of this study is to investigate the feasibility of co-incineration for MSW (municipal solid waste) and SS (sewage sludge) through the quantitative supply of sewage sludge. In this study, optimum water content to operate normally incinerator is 85%. In order to increase the workability of sewage sludge, it is necessary to supply properly water. In the case study of sites, optimum water content is 87% due to the water evaporation. Therefore, it was found that the water content up to 87% would be reached the stable operation of co-incinerator on the mixture of municipal waste solid and sewage sludge.

Key Words : Co-incineration, Sewage Sludge, Municipal Solid Waste, Slump Test, Workbility

요약 : 이 연구논문의 주요 목적은 하수슬러지와 생활폐기물을 혼합소각할 경우, 소각시설의 안정적 운영을 위해 가장 중요한 변수인 하수슬러지의 정량공급 방안에 관한 것이다. 실험결과, 슬럼프테스트와 유동화테스트를 통해 함수율을 약 87%로 정량공급할 경우, 하수슬러지의 표면연소를 보완하여 완전연소가 이루어 질 것으로 판단되어 향후 생활폐기물과 하수슬러지 혼합소각시 소각시설의 안정화에 기여할 것으로 판단된다.

주제어 : 혼합소각, 슬럼프테스트, 유동화테스트, 정량공급

1. 서론

2010년을 기준으로 하수슬러지는 하루 약 9,000톤이 발생되고 있으며, 계속적으로 증가하고 있는 추세이다. 국내의 경우 2003년 7월 1일부터 하수슬러지 직매립 전면 금지 및 96'의정서 발효에 따라 2012년부터 해양투기가 전면금지가 되면서 하수슬러지의 안정적 처분에 대한 대책이 시급한 상황으로 기존 소각시설을 이용한 처분방법이 최근 지자체에서 면밀히 검토되고 있다.¹⁾

현재 하수슬러지 처분방법의 경우, 각 지자체에서 소각, 매립, 해양투기 등과 같은 단순처분 방법으로 처분하고 있으나 2012년부터 유기성 슬러지류의 해양투기가 금지될 경우, 이에 대한 대책방안이 미비한 실정이다.

해양투기 처분방법의 경우, 평균 처분비용이 저렴(26,000원/톤)하나 해양오염이라는 2차적 환경오염을 유발, 슬러지 소각처분의 경우 소각로 건설비의 과다, 대기오염 배출 및 소각재에 의한 환경오염 유발 등 여러가지 단점을 지니고 있으나 슬러지 안정화/안전화를 통한 처분비용 절감 및 매립시 매립연한 증가 등과 같은 장점을 지니고 있다.²⁾

국내에서 발생하는 하수슬러지의 처리현황을 살펴보면,

Table 1에 나타난 바와 같이 2004년 6,647톤/일에서 2007년 7,518톤/일, 2010년 8,438톤/일로 꾸준히 증가하는 경향을 나타내고 있으며 처분방법으로는 해양투기가 2004년 77%에서 2010년 51%로 서서히 감소하고 있으나 전체 처분방법 중 약 51%를 차지하고 있으며 소각은 2004년 12%에서 2010년 21%로 급격히 증가하는 경향을 나타내었다.³⁾ 이는 각 지자체가 향후 해양투기 금지에 대응하기 위한 처분방법으로 소각처리를 선택했음을 의미한다.

생활폐기물과 하수슬러지 혼합소각시 하수슬러지의 정량공급은 소각로의 노내 온도를 850~950℃로 적정유지하기 위해서는 매우 중요한 변수로 작용한다.⁴⁾ 만일 정량공급이 이루어지지 않을 경우, 하수슬러지의 부하변동에 따라 소각로의 노내 온도를 적정하게 유지하기 어려우며 덩어리 형태로 하수슬러지가 투입될 경우, 단순 표면연소만 이루어지기 때문에 완전연소가 이루어지지 않아 다이옥신 발생 등 대기오염물질이 증가할 수 있으며 미연분이 다량 발생하여 2005년 이후 폐기물 관리법상의 바닥재의 강열감량 기준 5% 이하를 만족하기 어렵게 된다.⁵⁾ 이에 본 연구에서는 하수슬러지 처분대안으로서 하수슬러지를 생활폐기물과 혼합소각시 안정적 소각로 운영을 위한 하수슬러지의 정량공급

[†] Corresponding author E-mail: pcncjb@taeyoung.com Tel: 02-2090-6635 Fax: 02-2090-2241

Table 1. Quantity and disposal of domestic sewage sludge²⁾

(unit : t/day)

Year	No.	Quantity	Disposal quantity	Disposal					
				Reuse	Landfill	Combustion	Oversea disposal	Fuel	etc.
2004	268	6,647	6,647	655	94	776	5,121	-	-
2005	294	7,016	7,014	335	120	783	5,463	-	314
2006	344	7,514	7,511	920	119	842	5,513	-	117
2007	357	7,518	7,517	1,048	295	961	5,119	-	94
2008	403	7,719	7,718	1,462	285	1,255	4,716	-	-
2009	433	8,295	8,286	2,027	1,208	1,140	3,911	-	-
2010	470	8,438	8,438	1,741	926	1,492	3,600	654	26

방안에 대하여 슬럼프 테스트 및 유동화 테스트를 통해 고찰하고자 한다.

2. 본 론

2.1. 실험재료

본 연구에 사용된 하수슬러지는 D시 하수종말처리장에서 발생하는 시료를 이용하였으며 평균 수분함량은 Table 2에 나타난 바와 같이 78.8%로 나타났고 회분이 15.29%, 가연분은 5.91%로 각각 나타났습니다. 원소조성 결과 C가 2.80%, H가 0.98%, N가 0.25%, S가 0.18%, O가 1.95%로 각각 나타나 아래의 식 (1)(Dulong Equation)⁶⁾을 이용한 저위발열량은 58 kcal/kg로 나타났습니다.

$$LHV(kcal/kg) = 8,100C + 34,000(H-O/8) + 2,500S - 600(9H + W) \quad (1)$$

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

하수슬러지 용출시험⁷⁾ 결과, Table 3에 나타난 바와 같이 전 항목이 폐기물 용출시험 기준치 이하로 나타나 사업장 일반폐기물에 해당되는 것으로 나타났으며 생활폐기물과 혼합소각시 주변환경에 대한 영향은 적을 것으로 판단된다.

Table 2. Physical and chemical composition of sewage sludge

(as-received basis, wt.%)

Combustible material	Water content	ash	Chemical composition					Low heat value (kcal/kg)
			C	H	O	N	S	
5.91	78.80	15.29	2.80	0.98	1.95	0.25	0.18	58

Table 3. Results of leaching test of sewage sludge

(unit : mg/L)

Items	Pb	Cu	As	Hg	Cd	Cr ⁶⁺	Cr	Zn	CN	F	Phenol	O-P	PCB
Results	0.03	0.01	0.01	ND	ND	ND	0.11	0.31	ND	ND	ND	ND	ND
Standard	3	3	1.5	0.005	0.3	1.5	-	-	1.0	-	-	1.0	-

Table 4. XRF analysis of sewage sludge

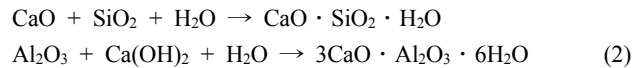
Items	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	TiO ₂	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	Organic matter	Total
%	9.78	22.4	10.2	4.25	1.24	1.27	0.42	1.02	4.92	1.02	43.26	99.78

2.2. 시료준비

하수슬러지를 소각로에 주입시 전처리(건조)를 거친 주입방법과 전처리를 거치지 않고 주입되는 방법이 있다. 전처리의 방법은 건조비용이 과다하여 에너지 효율측면에서 불리하며 후자의 방법은 식 (2)와 Table 4에 나타난 바와 같이 하수슬러지 내의 칼슘성분과 슬러지 내의 모래 그리고 수분이 결합하여 C-S-H 수화물을 형성함으로 주입관을 폐색시키는 현상⁸⁾이 발생할 수 있다. 그러나 주입관을 폐색되지 않게 하수슬러지의 유동성을 증가시키기 위해 적절한 수분을 공급하여 생활폐기물 표면에 도포(topping)할 수 있게 전 처리하면 소각로 내에서 생활폐기물과 하수슬러지 혼합소각시 하수슬러지의 표면연소에 의한 국부 연소를 미연에 방지할 수 있으며 하수슬러지의 완전연소를 유도하여 소각재의 양을 감소시킬 수 있다.

하수슬러지의 경우 SO₃가 1.02%로 나타나 석고의 존재를 확인할 수 있었으며 이는 터보모라이트와 에트링가이트⁹⁾와 같은 C-S-H 수화물을 형성함을 의미한다. 수화물의 형성은 주입관의 폐색현상의 주원인이 된다.

생활폐기물 시료의 경우는 원추사분법에 의해 채취된 시료를 준비하였다.



2.3. 하수슬러지 정량공급 실험

하수슬러지의 정량공급을 위한 수분함량을 결정하기 위하여 슬럼프 Test와 유동화 Test를 실시하였다. 슬럼프 Test 방법은 KS F 2402방법¹⁰⁾에 의해 실시하였으며 유동화 Test는 첨가되는 수분함량에 따라 하수슬러지의 공급현상을 규명하기 위해 자체적으로 고안한 방법으로 실시하였다.

2.3.1. 슬럼프 Test

Consistency¹¹⁾란 연도를 말하는 것으로 워커빌리티(Workability)의 한가지 성질을 나타낸다. 워커빌리티(Workability)는 연도, 유동성, 소성, 비분리성, 치어붓기의 난이도 및 마감성(Finishability) 등을 포함하는 성질로 이것을 측정할 정확한 방법이 없으므로 주로 컨시스턴스(Consistency)를 측정한다. 컨시스턴스(Consistency)의 시험방법에는 슬럼프시험(Slump test), 플로시험(Flow test), 관입시험(Penetration test) 및 낙하시험(Drop test) 등이 있으나 슬럼프시험은 간단하고 실용적이며 오늘날 가장 많이 사용되고 있다.¹²⁾

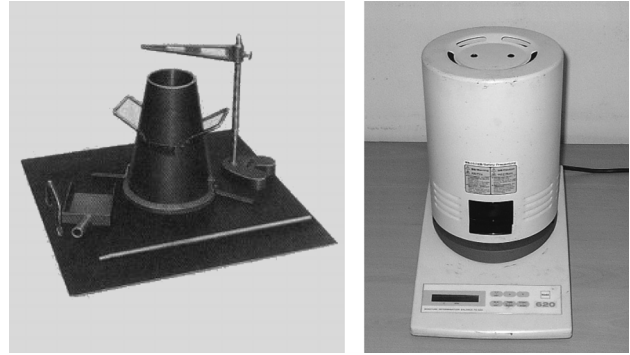
시료는 D시 하수종말 처리장에서 발생하는 슬러지를 이용하여 실시하였으며, 초기함수율은 75.4%인 것을 사용하였고 적절한 함수율의 계산을 위해 아래의 이론적 계산식(식(3))¹³⁾을 사용하였으며, 함수율의 확인을 위해 Kett사의 Moisture Determination Balance FD-620 이용하여 $\pm 1\%$ 의 오차범위에서 실험을 실시하였다(Fig. 1).

$$\text{함수율}(\%) = \frac{W+w}{Wt+w} \times 100 \quad (3)$$

여기서, W : 슬러지 내의 물의 무게

Wt : 슬러지 내의 고형물 무게 + 슬러지 내의 물의 무게

w : 추가되는 물의 무게



(a) Instrument of slump test (b) Moisture determination balance FD-620

Fig. 1. Instrument of slump and water content.

2.3.2. 유동화 Test

하수슬러지의 혼합소각시 소각로 내로의 원활한 공급을 위한 워커빌리티(Workability)의 확보를 위해 슬럼프 시험 결과를 기초로 하여 1차적으로 70~90% 사이의 범위에서 함수율을 5% 간격으로 기초실험을 통해 워커빌리티(Workability)를 평가한 후, 2차적으로 워커빌리티(Workability)가 어느 정도 확보되는 함수율 범위 즉 80~90%까지 각각 1% 간격으로 함수율을 조절하여 그 결과를 비교하였다.

3. 실험결과

3.1. Slump Test

슬럼프 실험은 물-하수슬러지비에 따른 “질다/되다”의 관계를 살펴보기 위해 실시하였으며, 슬럼프 실험 결과, Fig. 2에 나타난 바와 같이 함수율이 75% 이하일 경우 슬럼프의

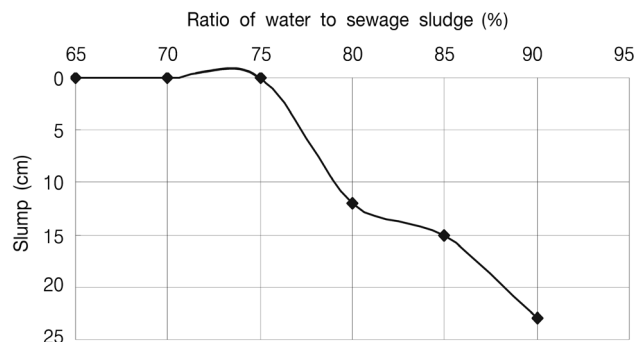
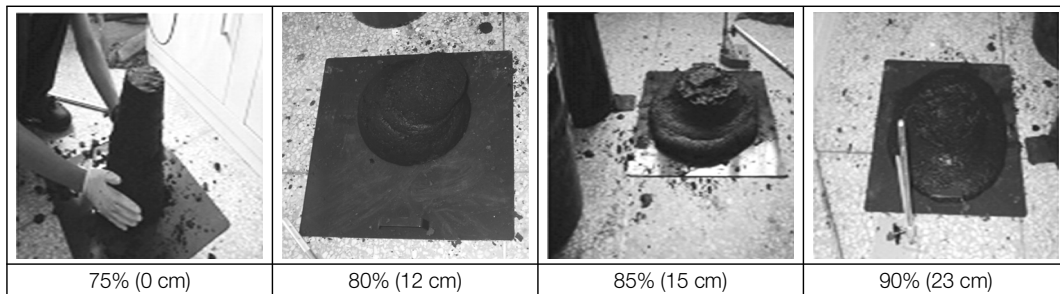


Fig. 2. Relation between slump and the ratio of water to sewage sludge.

높이가 0 cm를 유지하였고 함수율 80%에서 12 cm, 함수율 85%에서 15 cm, 함수율 90%에서는 23 cm의 슬럼프를 나타내었다. 초기높이의 50%가 되는 함수율 85%에서 적절한 유동화를 기대할 수 있을 것으로 판단되며,¹⁴⁾ 하수슬러지에 수분을 공급하여 약 85~90%로 투입시 생활폐기물과 하수슬러지 혼합소각시 생활폐기물 표면에 하수슬러지의 흐트럼짐(Topping) 현상이 발생되어 저 함수율(78~80%) 하수슬러지의 소각시설 투입에 따른 표면연소뿐만 아니라 완전연소가 이루어질 수 있을 것으로 판단된다. Fig. 2에 그래프로 도식화하여 나타내었다.

3.2. 유동화 Test

초기두께의 경우 Table 5와 Fig. 3~4에 나타난 바와 같이 함수율이 70%일 때 8 mm로 원형에 가깝게 배출되나, 함수율이 낮고, 고형물의 함량이 많아 유동성이 떨어져 끊기면서 배출되는 특성을 나타내었다. 함수율 80% 이상에서는 매끄러운 배출을 나타내어 이 함수율 이상에서 안전한 워커빌리티(Workability)를 확보할 것으로 예상되었다. 한편 함수율이 90%일 때 초기두께가 5 mm로 나타났는데 함수율 80%와 85%보다 다소 높게 나타난 것은 함수율이 높아 곤죽상태의 하수슬러지가 다량으로 배출되어 나타난 결과로 판단된다.

Fig. 3의 결과를 토대로 2차적 워커빌리티(Workability)를 평가시험한 결과, 즉 하수슬러지 정량공급을 위한 유동화 Test 결과를 분석하면 다음과 같다(Fig. 4).

Table 5. Thickness of sewage sludge with variation of water content

Water content (%)	70	75	80	85	90
Initial thickness (mm)	8	7	3	3	5
Thickness after 1day (mm)	4	5	2	2	2

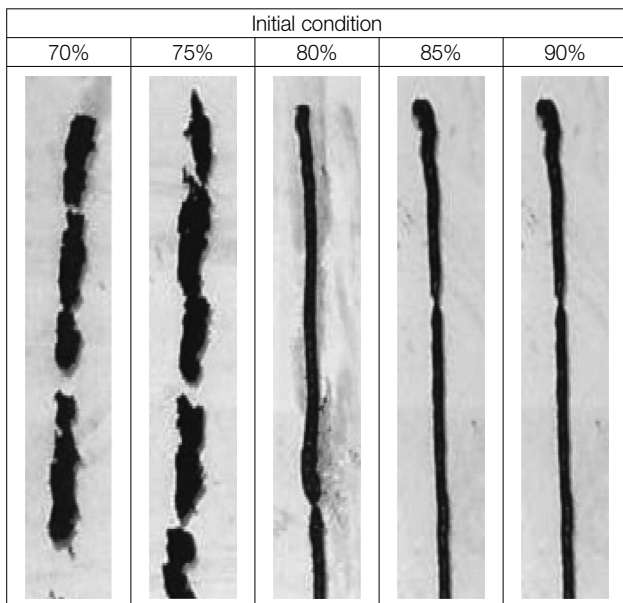


Fig. 3. Physical properties with variation of initial water content.

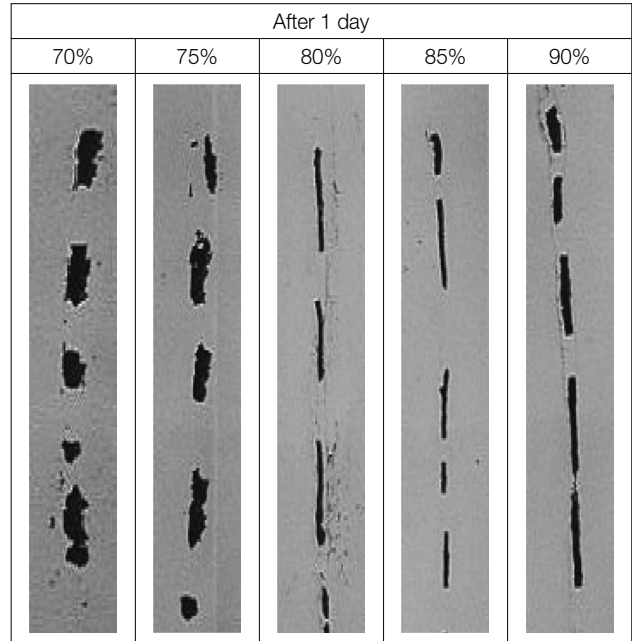


Fig. 4. Physical properties with variation of water content after 1 day.

1일 경과 후 두께의 경우 함수율이 70~80%일 때 4~5 mm를 나타내었으나, 함수율 80% 이상에서는 2 mm로 두께가 얇아지는 것으로 나타났다. 함수율이 높은 경우가 함수율이 낮은 경우보다 1일 경과 후 두께가 얇아진 것은 높은 함수율로 인한 투입 하수슬러지 층이 확산되었기 때문이며 또한 수분함량이 하수슬러지가 함유할 수 있는 한계치보다 높아 수분이 하수슬러지 고화에 이용되지 않고 하수슬러지 외부로 유출되어 수분증발이 급속히 이루어졌기 때문¹⁵⁾으로 판단된다.

기초시험에서 함수율 80% 이상에서 원하는 워커빌리티(Workability)가 나타나는 것으로 판단되어 80~90% 사이의 함수율에 따른 유동화 시험을 통해 최적의 워커빌리티(Workability)를 찾았으며, 함수율은 실험의 정확도를 위해 1% 간격으로 총 11가지(80~90%)로 분류하여 측정하였다.

Fig. 5에 나타난 바와 같이 유동화가 어느 정도 일어난다고 보는 시점은 82%로 매끄럽지는 않으나 부분 곤죽상태의 하수슬러지가 다량 분포하고 있는 것이 관찰되었다. 또한 88% 이상에서는 그림에서는 확인하기 어렵지만, 하수슬러지 주위로 물이 스며 나오는 현상을 나타내었다. 88% 이상의 함수율에서는 소각로 내로 하수슬러지 투입시 큰 어려움은 없을 것으로 판단되나 하수슬러지와 물의 혼합시 충분한 교반이 없을 경우 물이 하수슬러지에 흡수되지 않은 상태 즉, 순수한 물 자체가 소각로 내로 들어갈 우려가 있을 것으로 판단되며 이로 인해 소각로의 안정적 운전이 어려워질 것으로 판단된다.

하수슬러지에 추가되는 물의 양과 워커빌리티(Workability)를 고려할 때 85%가 최적의 함수율이라고 판단되며, 현장성을 고려할 때 여유율을 두어 85~87%에서 원활한 워커빌

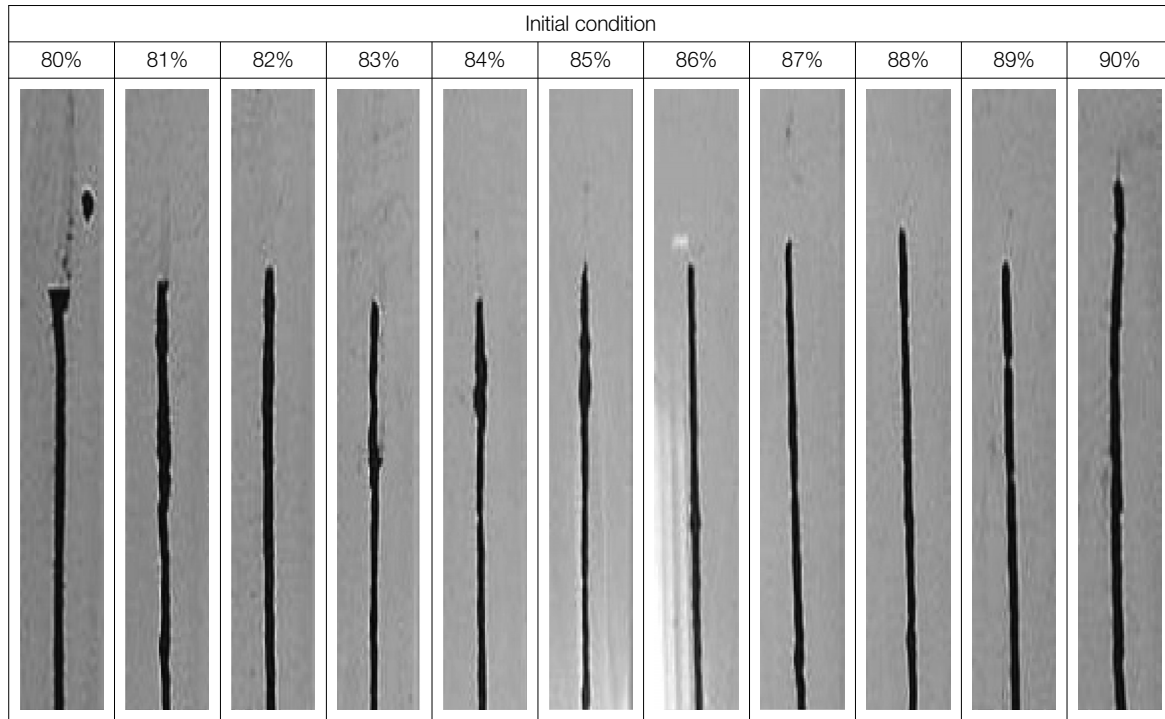


Fig. 5. Physical properties with variation of water content.

리티(Workability)를 나타낼 것으로 판단된다.

4. 결론

위의 결과를 토대로 다음과 같은 결론에 도달하였다.

1) 슬럼프 테스트 결과, 초기높이(30 cm)의 50% (15 cm)가 되는 함수율 85%에서 적절한 유동화를 기대할 수 있어 생활폐기물과 하수슬러지 혼합소각시 하수슬러지의 국부 표면연소가 아닌 균질연소가 가능할 것으로 판단되며 이로 인해 고발열 생활폐기물의 투입시에도 하수슬러지의 균질 연소에 따라 소각로의 안정적 운영이 가능할 것으로 판단된다.

2) 유동성 테스트 결과, 소각로 내에 하수슬러지 투입시 생활폐기물 상부에 균질하게 퍼지는 함수율은 슬럼프 테스트의 결과 및 추가되는 물의 양과 워커빌리티(Workability)를 고려할 때 85%가 최적의 함수율이라고 판단되며 현장성을 고려할 때 증발되는 수분량을 고려하여 85~87%의 함수율로 조정하여 소각로 내로 하수슬러지를 투입되도록 하면 소각로의 안정적 운영이 가능할 것으로 판단된다.

3) 향후 함수율을 87%까지 높인 하수슬러지 투입시 저위 발열량을 현장 실험을 통해 검증해야 할 것으로 판단된다.

하수슬러지를 80%의 함수율로 투입할 경우, 소각로 내에서 덩어리화 되어 표면연소만 일어나 바닥재의 양이 증가하므로 이에 대한 법적 기준치 만족(강열감량 5% 이내) 및 소

각로의 안정적 운영을 위해서는 하수슬러지 이송배관에 수분을 공급할 수 있는 설비를 설치하여 이에 대응을 해야 할 필요가 있을 것으로 판단된다.

KSEE

참고문헌

1. Kim, G. S., "Reduction and Reuse of Sewage Sludge," *J. Environ. Hi-technol.*, **6**(7), 10~17(1998)
2. KAIST, "Development of Grate and supply device for co-incineration of industrial waste," pp. 17~20(2002)
3. Ministry of Environment, "sewerage statistics," p. 1232 (2011)
4. Seo, Y. C., "Industrial Waste Treatment," Sinkwang publishing co., pp. 15~18(2000)
5. Ministry of Environment, "Waste Management Law enforcement regulations"(2005)
6. Ministry of Environment, "Development of Process and Device for Co-incineration of Municipal Solid Waste and Organic Sludge," pp. 184~1869(2006)
7. Bae, S. K., "Co-incineration of Municipal Solid Waste and Sewage Sludge," *J. Kor. Soc. Waste Manage.*, **18**(3), 39~48(2001)
8. J. Werther, and T. Ogada, "Sewage sludge combustion," *Prog. Energy Combust. Sci.*, **25**, 55~90(1999)
9. Bensted, J. and Barnes, P., "Structure and Performance of Cements," Spon Press, p. 50(2002)
10. Jeon, Y. B., "Construction Materials and Tests," Dong Hwa Technology, p. 104(2010)

11. Lee, S. I., "Soil Tests and explanation," ChoungWoon Co., pp. 57~61(2001)
12. Cheon, B. S., "Geotechnical Engineering," GooMeeSeoKwan, pp. 61(1998)
13. Kim, Y. K., "Geotechnical Engineering Tests and practice," SeJin, pp. 15~20(1997)
14. Shim, J. I., "A Workability of light weight-Concrete and A Impact of Coarse aggregate maximum Size for mechanic properties," *Arch. Inst. Kor.*, **28**(5), 61~68(2012)
15. Park, D. Y., "A Study on Water Evaporation of Sludge and Drying Performance in a Dryer with Heating Disk," University of Seoul master's thesis, pp. 14~20(2011)