

Research on composting of sewage sludge using dryer facility with indirect heating system

간접가온 건조방식의 건조시설을 이용한 하수슬러지 퇴비화에 관한 연구

Seon-Jai Baik^{1*} · In-Sup Han¹ · Ick-Hoon Choi² · Sung-Hyo Kang³ · Seong-Min Hong³

백선재* · 한인섭¹ · 최익훈² · 강성효³ · 홍성민³

¹University of Seoul, Environmental Engineering · ²Korea Environment Corporation · ³ARK Co., Ltd.

¹서울시립대학교 환경공학과 · ²한국환경공단 · ³(주)ARK

Abstract : The need of reusing sewage sludge is highly increasing as the amount of domestic sewage sludge is growing and sewage management strategies were reinforced. Accordingly, in this research, we studied the composting possibility of sludge in sewage treatment plant J, using dryer facility with indirect system by conducting component analysis of dried sludge and experiment on cultivating crops. It was observed from the component analysis, that the dried sludge is appropriate for both decomposed manure standard of Ministry of Environment and fertilizer standard of Rural Development Administration. Besides, in the experiment on cultivating lettuce, the experimental group(soil + dried sludge) was superior to the control group(soil + bed soil) in apparent condition of leaves tensity and damage by disease and pest. In case of cultivating tomato, the experimental group showed stronger durability of fruits dangling on stems compared to the control group after 9 weeks. Consequently, the excess sludge dried by indirect heating system in the sewage treatment plant J is appropriate for the standard of both Ministry of Environment and Rural Development Administration and show good result in experiment on cultivating crops therefore it can be reused for composting.

Key words : excess sludge, composting, indirect heating system, dryer facility

주제어 : 잉여슬러지, 퇴비화, 간접가온방식, 건조시설

1. 서론

국내 하수도 보급률의 증가에 따라 하수처리장으로 유입되는 하수량이 매년 증가하고 있으며, 이에 따라 하수슬러지의 발생량도 비례하여 증가하고 있다(Ministry of Environment, 2011). 반면, 하수슬러지는 폐기물관리법에 의거 2000년 4월부터 직매립 금지 및 해양환경관리법에 의거 2012년 1월부터 해양투기가 전면 금지되었다. 이

와 같이 하수슬러지 처리 시 각종 규제강화로 인해 많은 문제점을 안고 있는 기존 방법에서 탈피하여 환경오염의 부담을 줄이면서 하수슬러지를 처리할 수 있는 방법으로 소각 및 재활용 등에 대한 관심이 부각되고 있다. 그 중 소각처리는 열회수와 약 90%의 부피를 줄일 수 있는 장점이 있으나 다이옥신, SO_x, NO_x 등과 같은 대기오염물과 소각재 중 중금속 함량이 높아 2차 오염을 유발할 수 있는 문제점을 가지고 있다(Lee et al., 2011). 따라서, 슬러지의 건조에 의한 자원순환적 재활용과 이와 관련된 연구 및 실용화 방안이 많은 관심을 받고 있다. 일본의 경우, 제지 슬러지

* Received 21 March 2014, revised 24 April 2014, accepted 30 April 2014.

* Corresponding author: Tel : 010-7323-5135 E-mail : sjback@keco.or.kr

를 퇴비화, 토양개량제, 지렁이 양식 등으로 재활용하고 있으며, 미국에서는 펄프 및 제지슬러지를 토양개량제, 보조연료 등으로 재활용하고 있다. 국내에서도 연료화, 퇴비화 및 건축자재 등 슬러지 재활용에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 그 중 퇴비화는 숙성기간이 길고 퇴비화를 위한 넓은 공간이 필요하여 연속적인 퇴비화 생산에 어려움이 있다(Kim et al., 2011). 또한, 슬러지 퇴비화에 대한 관련제도 및 기술적 문제 등 제반여건 등으로 인해 하수슬러지의 재활용이 활발히 진행되지 못하였다. 이러한 문제들의 해결방안으로 환경부에서는 제2차 국가폐기물관리종합계획(2002 ~ 2011)이 추구하는 정책목표를 지속가능한 '자원 순환형 경제사회기반 확립'으로 설정하고 이를 위한 정책개발 및 집행에 역량을 집중하고 있다(Choi et al., 2005).

따라서, 본 연구는 간접가온 건조방식의 건조시설을 이용하여 J 하수처리장의 잉여슬러지를 건조한 후, 슬러지의 성분분석 및 작물재배 실험을 수행하여 건조슬러지의 퇴비화 가능성에 대하여 알아보았다.

2. 재료 및 방법

본 연구는 환경부 지원으로 개발된 간접가온 방식의 건조시설을 이용하여 J 하수처리장에서 발생하는 잉여슬러지의 퇴비화를 위한 최적의 건조 온도 및 시간을 도출하였으며, 최적의 조건에서 건조된 슬러지의 성분분석 및 작물재배 실험을 수행하였다. 건조온도는 100, 120, 140, 160, 180, 200 °C로 20 °C씩 변화를 주었으며, 각 온도별로 잉여슬러지의 수분변화를 2시간 간격으로 16시간 동안 측정하였다.

퇴비화를 위한 건조시설은 Fig. 1과 같이, 건조시설의 내부용적은 80 l (Φ300 mm×1,000 mmL)이며 안전율을 고려하여 잉여슬러지 60 kg을 퇴비화 실험에 사용하였다. 열매체유 유입구와 배출구는 자켓형식으로 장치외부로 순환할 수 있는 구조이며, 슬러지의 교반날개는 6개로

열접촉면과 교반(7.3 rpm) 및 건조 후 파쇄를 동시에 수행할 수 있는 구조로 되어있다. 열매체유(Therminol 66, Solutia Inc., USA)는 최대 300 °C까지 가온이 가능하며, 열매체유의 순환은 100 L/min 펌프를 사용하였다.

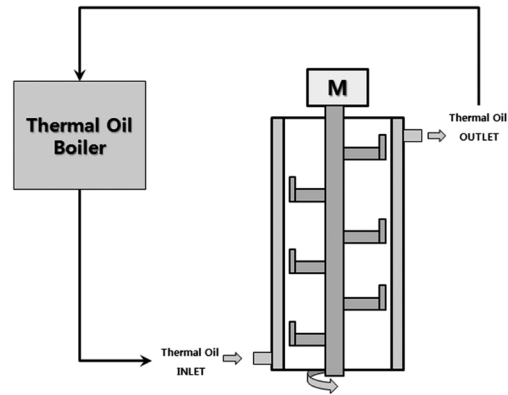


Fig. 1. Schematic diagram of sludge dryer facility.

또한, 폐기물공정시험방법(Ministry of Environment, 2010)에 따라 건조슬러지의 성분분석을 수행하여 환경부의 '부숙토 제품기준' 및 농촌진흥청의 '비료 지정기준'과 비교하였으며, 건조슬러지의 퇴비화 가능성을 알아보기 위해 작물재배 실험을 수행하였다.

작물재배 실험은 농촌진흥청의 작물재배법에 준하여 잎작물인 상추와 열매작물인 토마토를 대상으로 약 2개월(2013.07.10 ~ 2013.09.10, 9주) 동안 대조군과 실험군을 각각 3개씩 중복하여 실험하였다. 작물재배 실험을 위한 대조군은 상토((주)신성미네랄)와 흙을, 실험군은 건조슬러지와 흙을 Table 1과 같이 일정비율로 혼합하여 사용하였다.

Table 1. Composition of growth medium for cultivating crops

Group	Vegetable	Lettuce (leaf vegetable)	Tomato (fruit vegetable)
	Control group	Soil	5 kg
Experiment group	Bed soil	0.043 kg	0.071 kg
	Dired sludge	5 kg	5 kg
		0.043 kg	0.071 kg

재배실험의 용기는 D200 mm×300 mmH (5T)의 투명아크릴로 제작하였으며, 100 mmH의 배수공간을 확보하여 실험 작물의 뿌리부분이 상하지 않고 수분이 아래로 원활히 빠져나갈 수 있도록 재배환경을 유지하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 잉여슬러지의 수분변화 및 성분분석 결과

퇴비화 실험을 위한 최적의 건조조건을 도출하기 위하여 건조온도를 100 ~ 200 °C까지 20 °C 간격으로 변화시키고, 건조온도별로 16시간 동안 2시간 간격으로 함수율을 측정하였으며 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

100 °C에서 140 °C까지는 함수율의 변화가 비교적 작았으나, 160 °C에서 200 °C까지는 6시간 이후부터 함수율이 크게 감소하였고, 16시간 경과 후에는 5.3 %의 함수율로 수렴하였다. 또한, 함수율 10 % 이하로 낮추기 위해 사용된 누적 전력량은 100 °C, 120 °C, 140 °C, 160 °C, 180 °C, 200 °C에서 각각 200 kW 이상, 211.2 kW, 205.3 kW, 148.4 kW, 171.6 kW, 172.7 kW로 측정되었다. 따라서, 전력소비량을 최소화하면서 함수율을 최대한 낮출 수 있는 최적의 건조조건으로 건조온도 160 °C와 건조시간 16시간을 선정하였다.

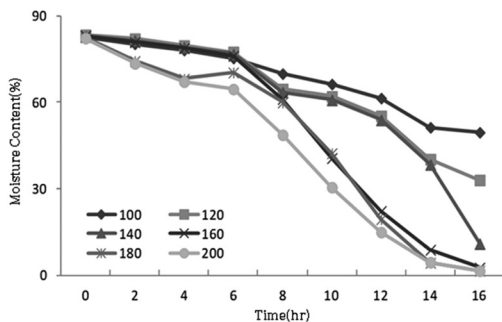


Fig. 2. Variation of moisture content for excess sludge.

또한, 최적의 건조조건에서 잉여슬러지의 건조 전과 후의 성상을 분석하였으며 그 결과, TS

는 15.9 %에서 94.8 %로 78.9 %p 증가하였고, VS는 12.3 %에서 75.8 %로 63.5 %p 감소하였으며, 함수율은 83.9 %에서 5.2 %로 78.7 %p 감소하였다.

Na et al.(2012)은 슬러지의 온도상승을 위한 열전달 속도를 올리는 방법으로 교반을 통한 간접가온 건조방식을 제시하였으며, 본 연구에서도 교반속도(열접촉 회수)를 증가시켜 열전달 속도를 높여주었다. 또한, 본 연구에 사용된 간접가온을 이용한 건조기의 용량은 약 300 ~ 1,000 kg-DS/일(하수처리장 중·소규모 수준)이 가능할 것으로 판단되며, 간헐 회분식으로 수행한 본 연구의 한계로 추후 연속운전을 통해 지속사용에 따른 문제점의 보완이 필요한 것으로 사료된다.

현재 상용화되어 있는 기계화된 고속퇴비화 공정은 품질 좋은 퇴비생산을 위해서 정확한 수분조절 및 일정기간 이상의 부숙화 기간이 필요하다. 하수도시설기준에 따르면 퇴비 생산과정에서 생길 수 있는 환경보건적인 안전성을 확보하고 토지개량제로서 적합한 제품을 생산하기 위해 하수슬러지의 퇴비화를 위한 분해기간은 30 ~ 74일이 필요한 것으로 제시(Korea Water and Wastewater Works Association, 2011) 되고 있어, 16시간이 소요되는 간접가온 방식의 건조시설로 퇴비를 생산할 경우 퇴비화 시간이 크게 단축될 것으로 사료된다. 아울러, Hwang et al.(2009)의 연구에서는 슬러지 건조 또는 탄화 후, 퇴비화로 사용할 경우 고온성의 조건 유지, 유기물 분해의 활성화, 적절 수분함량의 유지 및 퇴비 겉보기 밀도의 향상 등이 되었다고 제시하였다.

3.2 퇴비화 적합성 실험결과

간접가온 방식의 건조시설을 이용하여 건조된 잉여슬러지의 중금속 등 퇴비화를 위한 기준 항목을 분석하여 Table 2에 나타내었다. 크롬은 26 mg/kg, 납은 17 mg/kg, 카드뮴, 수은,

Table 2. The Result of performance test on composting

Parameter	Regulation Values		Component analysis	Results
	Ministry of Environment 'A' level	Rural Development Administration		
Cr(mg/kg)	below 300	below 200	26	Conformed
Pb(mg/kg)	below 150	below 130	17	"
Cd(mg/kg)	below 5	below 2	N,D	"
Hg(mg/kg)	below 2	below 2	N,D	"
As(mg/kg)	below 50	below 45	N,D	"
Cu(mg/kg)	below 500	below 360	198	"
Organic(%)	above 25	above 12	66.5	"
C/N ratio(%)	below 50	-	11.2	"
Salinity(%)	below 1	-	0.15	"
Moisture(%)	-	below 80	5.3	"

비소는 불검출 되었으며, 구리는 198 mg/kg로 나타났다. 그 외에 유기물은 66.5 %, C/N 비는 11.2 %, 염분농도는 0.15 %, 수분은 5.3 %로 나타나 환경부의 '부숙토 제품기준, 가 등급' 및 농촌진흥청의 '비료 지정기준'에 적합하였다. 이는 J 하수처리장이 연계처리를 하지 않고 생활오수만을 처리하며, 건조시 별도의 화학적 후처리 공정이 없어 중금속의 농도가 높지 않은 것으로 판단된다. 한편, 잉여슬러지 건조 시 간접가온 온도는 160 ℃로서 유기성 폐기물의 퇴비화 과정에서 발생될 수 있는 각종 세균 및 해충 발생문제를 해결할 수 있을 것으로 판단된다.

3.3 작물재배 실험결과

(1) 상추 재배실험 결과

잎작물인 상추의 재배실험은 기온 28 ~ 38 ℃, 습도 40 ~ 55 %의 조건으로 9주간 수행하였다. 9주 후 상추의 잎 갯수는 Fig. 3와 같이 실험군과 대조군이 각각 평균 21장과 22장이었고, 작물의 최고길이는 대조군과 실험군 모두 16 ~ 19 cm로 비슷한 생장율을 보였다. 이 때의 잎의 개수와 성장률에 대한 실험 표준오차는 약 5 %였다. 결보기 상태는 Fig. 4와 같이 실험군이 대조군에 비하여 잎의 강도 및 병충해 피해부분에 있어 상태가 양호한 것으로 나타났다.

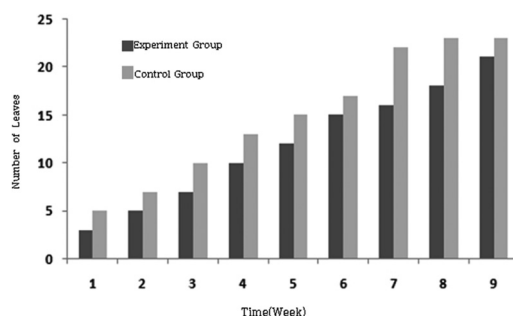


Fig. 3. Comparison of the number of leaves for the lettuce.

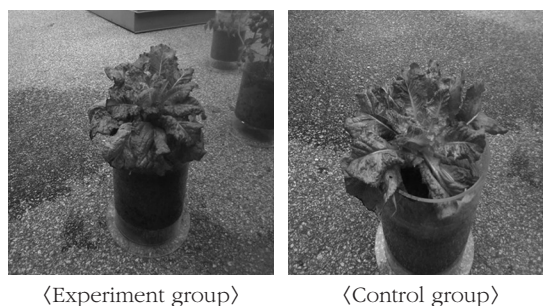


Fig. 4. Picture of cultivating the lettuce.

(2) 토마토 재배실험 결과

열매작물인 토마토의 재배실험도 상추와 동일 조건(온도 28 ~ 38 ℃, 습도 40 ~ 55 %)으로 9주간 수행하였다.

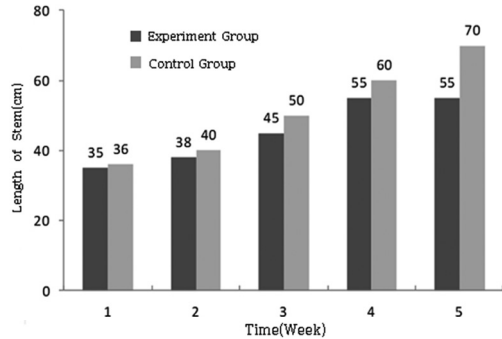


Fig. 5. Comparison of the length of stem for the tomato.

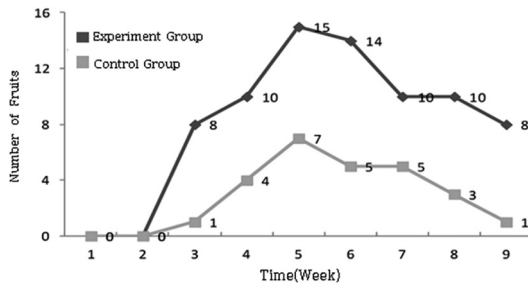


Fig. 6. Comparison of the number of fruits for the tomato.



〈Experiment group〉 〈Control group〉

Fig. 7. Picture of cultivating the tomato.

5주 경과 후, Fig. 5과 같이 줄기는 대조군이 실험군에 비해 평균 15 cm 높게 성장하였으나, 과실수 생산량은 Fig. 6과 같이 실험군이 평균 15개, 대조군이 평균 7개로 실험군이 우수한 것으로 나타났으며, 실험 표준오차는 약 3 %였다.

아울러, 9주 경과 후 토마토 과실이 줄기에 매달려 있는 지속성을 식(1)에 따라 산정한 결과, 실험군이 86 % (15개 중 8개), 대조군이 14 % (7

개 중 1개)로 실험군이 우수한 것으로 나타났다. 또한, 5주 후 과실의 걸보기 익은 정도는 Fig. 7과 같이 실험군이 대조군에 비해 우수한 것으로 나타났다.

$$\text{Durability}(\%) = \frac{a - b}{a} \times 100 \quad (1)$$

a: the number of maximum fruits

b: the number of dangling fruits

4. 결론

본 연구는 J 하수처리장에서 발생하는 잉여 슬러지를 대상으로 간접가온 방식의 건조시설을 이용하여 퇴비를 생산한 후 성분분석 및 작물재배 실험을 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 건조시설을 이용하여 잉여슬러지의 퇴비화 기준을 만족하는데 최적의 건조온도는 160 ℃, 건조시간은 16시간이 소요되어, 하수도시설기준에 따른 퇴비화의 분해기간(최소 30일)을 크게 단축시킬 수 있을 것으로 판단된다.
2. 건조시설을 이용하여 생산된 퇴비를 대상으로 중금속 함량 등 퇴비화 기준항목을 분석한 결과, 크롬은 26 mg/kg, 납은 17 mg/kg, 구리는 198 mg/kg, 카드뮴, 수은, 비소는 불검출되었으며, 그 외에 유기물은 66.5 %, C/N 비는 11.2 %, 염분농도는 0.15 %, 수분은 5.3 %로 나타나 환경부의 '부숙도 제품기준, 가 등급' 및 농촌진흥청의 '비료 지정기준'에 적합하였다.
3. 건조시설을 이용하여 생산된 퇴비로 작물재배 실험을 수행한 결과, 상추의 경우 잎사귀 수는 유사하였으나, 잎사귀의 걸보기 상태(강도) 및 병충해에 의한 피해정도는 실험군이 우수한 것으로 나타났다. 토마토의 경우는 재배실험 5주 경과 후 줄기는 대조군이 실험군에 비해 15 cm 높게 성장하였으나, 과실수는 실험군이 15개, 대조군이 7개로 실험군이 우수한 것으로 나타났

다. 또한, 재배실험 9주 경과 후 토마토 과실의 줄기에 매달려 있는 지속성은 실험군이 86%(15개 중 8개), 대조군이 14%(7개 중 1개)로 실험군이 우수하였다.

4. 간접가온 방식의 건조시설을 이용하여 생산된 퇴비는 환경부 및 농촌진흥청의 퇴비화 기준을 모두 만족하고 작물재배 실험에서도 양호한 결과를 나타내어 퇴비로 사용이 가능할 것으로 판단되었다.

사 사

본 연구는 환경부 “글로벌탑 환경기술개발사업”으로 지원받은 과제(과제번호 GT-11-B-01-018-0)로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- Choi, H.M., Ha, S.A., Kim, P.S. and Bae, K.J. (2005) Technology Development of drying/pyrolysis process to reduce domestic sewage sludge, *Korea Society of Waste Management 2005*, pp.370-373.
- Hwang, E.J. and Jeon, K.S. (2009) Carbonized Sludge as Moisture Amendment in Composting, *J. of Korea Society of Waste Management*, **26(4)**, pp.356-366
- Kim, Y.R. and Son, M.I. (2011) Sludge Drying Method Using Microwave Drying Device and Heat Transfer Medium Oil, *J. of the Korean Oil Chemists' Soc.*, **28(3)**, pp.367-373.
- Korea Water and Wastewater Works Association (2011) *Standard of Wastewater System*
- Lee, C.H., Kim, S.C. and Jeon, Y.N (2011) Characteristics on Carbonization and Steam Activation in Dried Sewage, *Korea Water Congress 2011*, pp.331-334.
- Ministry of Environment (2010) *Official Wastes Test Method*
- Ministry of Environment (2011) *Statistics of Wastewater*
- Na, E.S., Shin, S.S., Shin, M.S. and Jang, D.S. (2012) A Study on the Optimum Design of Multiple Screw Type Dryer for Treatment of Sewage Sludge, *J. of Korean Society of Environmental Engineers*, **34(4)**, pp.223-231
- Rural Development Administration www.rda.go.kr.