하수슬러지 소각 비산재를 이용한 입상비료 조립 및 특성분석

Characterization of Granular Fertilizer Produced by Fly Ash from a Sewage Sludge Incinerator

김성범 · 이원태^{*}
Seong-beom Kim · Wontae Lee^{*}

금오공과대학교 환경공학과
Department of Environmental Engineering, Kumoh National Institute of Technology

(Received March 28, 2016; Revised October 19, 2016; Accepted October 24, 2016)

Abstract : This study assessed feasibility of making granular fertilizer with fly ash from a sewage sludge incinerator in Korea. Composition, characteristics, strength, and heavy metal contents of the granular fertilizers were investigated. Due to its high contents of phosphorus, fly ash from a sewage sludge incinerator could be used to make fertilizers. Granulation rates (2-4 mm granules) over 80% could be achieved as the fly ash contents were 15% or less of the fertilizer. Leaching tests of the fertilizers, based upon the Korean Standard Methods for Solid Wastes, showed the concentrations of heavy metals less than the risk limits. However, contents analysis of the fertilizers, based upon the Korean Standard Methods for Soils, experienced higher levels of heavy metals than the risk limits as the fly ash content exceeded 7% of the fertilizer. Thus, the fly ash needs to be added less than 7% of the fertilizer if there is no pretreatment to remove heavy metals.

Key Words : Sewage Sludge, Fly Ash, Granular Fertilizer, Recycling

요약 : 생활하수슬러지만 소각하는 시설에서 발생하는 비산재를 비료 제조시 주원료 또는 부원료로 활용하기 위해 비산재를 원료로 비료를 제조하고 구성성분을 분석하였다. 비산재를 포함해 제작된 비료의 구성 및 물성, 강도, 중금속에 대한 위해성 등을 분석하였다. 비산재는 충분한 인을 함유하여 비료의 원료로 사용될 수 있으나, 비산재를 주원료(40% 이상 포함)로 비료를 제작할 경우 조립화율(2-4 mm 입자 형성율)을 80% 이상 달성할 수 없었다. 비산재를 보조원료로 첨가하여 비료를 제조할 경우, 비산재 함유량을 15%이하로 유지하면 조립화율을 80% 이상 달성할 수 있었다. 비산재를 보조원료로 조립화된 비료의 중금속 분석결과, 폐기물공정시험기준인 용출시험에서는 위해성이 없는 것으로 나타났다. 그러나 토양오염공정시험의 함량분석 상으로는 비산재 함유량이 높아짐에 따라 카드뮴 등 중금속 위해성을 초과하는 항목이 발생되었다. 따라서 비료제작시 비산재를 보조원료로 투입할 경우 중금속을 제거하기 위한 전처리를 하지 않는다면 비료원료의 비산재 함유량을 7% 이하로 유지하는 것이 바람직하다.

주제어 : 하수슬러지, 비산재, 입상비료, 재활용

1. 서론

환경부의 '2014년 하수도통계'에 따르면 국내에서 발생하는 하수슬러지는 매년 300만 톤 이상으로 2005년에 비해 100만 톤 이상 증가한 수치이다. 하수슬러지 발생량이 증가함에 따라 하수슬러지 처리시설의 수도 2005년 294개소에서 2014년 597개소로 증가하였다.¹⁾ 2011년까지 하수슬러지 발생량의 대부분을 해양투기로 처리하였으나, 2012년부터 '폐기물이나 다른 물질의 투기를 규제하는 해양오염 방지조약'에 따라서 해양투기 대신 소각, 매립, 재활용의 방법으로 처리하고 있다. 특히 환경적인 측면에서 가장 적합한 방법인 하수슬러지의 재활용에 대한 관심이 높아지고 재활용 양도 매년 증가하고 있다. 국내의 하수슬러지는 연료화 및 골재화로 재활용 되어왔으나 2014년부터는 비료화도 추진되고 있다. 2014년 기준 비료화의 비중은 하수슬러지 생산량의 6.8%에 해당하고 있는데, 향후 '자원순환사회 전환촉진법'이 시행된다면 하수슬러지의 비료화 비율은 더욱

높아질 것으로 예상된다.²⁻⁴⁾

하수슬러지를 비료로 활용할 수 있는 가장 큰 이유는 인 함량이 높기 때문이다. 국내에서 선행된 연구결과에 의하면 하수슬러지에는 P_2O_5 가 8% 가량 함유되어 있고 하수슬러지 소각 시 발생하는 바닥재와 비산재에는 P_2O_5 가 각각 1~5%, 1~15% 함유되어 있어 비료의 원료로 충분히 사용가능하다.⁵⁾ 한편, 인비료의 주 원료인 P_2O_5 는 국내에서 생산되지 않는 인광석에 함유되어 있다. 인광석의 주요 수출국은 미국, 중국, 모로코, 요르단 등으로 최근 생산국에서 채굴 및 수출을 제한함에 따라 4~5년마다 원료가격이 40%가량 인상되고 있다. 따라서 하수슬러지를 재활용하여 인(P)자원을 회수하는 것은 폐기물을 자원으로 활용함으로써 얻을 수 있는 경제적·환경적 이점뿐만 아니라 우리나라 인(P)자원 확보의 한 방안이 될 수 있을 것이다.⁶⁻⁸⁾

국내에서 발생하는 하수슬러지 소각재를 활용한 비료화 연구는 다수 수행되었다. 국내 선행연구들에서는 비산재의 비료화 가능성은 제시하고 있으나, 인의 함량이 낮거나 중

^{*} Corresponding author E-mail: wtlee@kumoh.ac.kr Tel: 054-478-7636 Fax: 054-478-7859

금속 함량이 높아 한계를 나타내는 경우가 있었다.⁹⁻¹³⁾ 또한, 국내에서 선행된 대부분의 연구는 생활하수슬러지 외에 다른 하수슬러지도 유입되는 소각로에서 발생한 부산재를 활용하였다. 이에 본 연구에서는 생활하수슬러지만을 소각하는 경우 중금속 등의 함유량이 낮아 비료화의 가능성이 더욱 크다는 가설을 세우고 생활하수슬러지만 전량 소각하는 A 소각장에서 발생하는 부산재를 이용하여 비료원료화 가능성을 살펴보았다. 또한 부산재를 활용한 비료 조립화 조건을 도출하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1. 부산재 및 조립화 재료

본 연구에 사용된 부산재는 생활하수슬러지만을 수집 후 소각하는 A 하수슬러지 소각시설에서 채취하였다. 발생된 하수슬러지를 본 소각시설로 반입하는 하수처리장들은 기본적으로 생물학적처리와 고도처리(질소, 인 제거) 공정으로 구성되어 있다. 본 소각시설은 하루 약 300톤의 하수슬러지를 소각하고 있는데, 현재 하수슬러지 소각 후 발생하는 부산재가 폐기물로 분류되어 재처리되거나 재이용되지 않고 폐기 처분(처리비용 약 70,000원/ton)되고 있다.

비료 조립을 위해서는 조립재가 필요한데, 본 연구에서는 일반적으로 사용되는 카올린, 벤토나이트, 규사를 사용하였다. 카올린은 1~10 μm 의 크기를 지니며 평균 입자크기는 4.7 μm 를 나타내었다. 벤토나이트는 5~20 μm 의 크기를 지니고 있으며 평균 입자크기는 6.9 μm 이었다. 규사는 0.15 mm로 체 거름 되어 일정 크기를 지니는 제품을 사용하였다. 또한 화학적 결합을 유도하기 위하여 지름 2 mm의 요소를 투입하였다.

2.2. 실험 장치 및 운전 조건

조립화 장치는 원판형(지름 300 mm) 교반기로 열과 수분에 강한 스테인리스(STS) 재질로 제작하였다. 기기의 작동은 발판형 제어기를 이용하여 실험이 용이하도록 하였다. 조립시 수분은 2 ± 0.5 mL/회 분사가 가능한 분무기로 공급하였고, 1,300℃ 안전토치를 사용하여 가열하였다. 모든 실험은 비산하는 재 및 시약의 제거를 위하여 풍속 제어가 가능한 Fume Hood 내에서 실시하였다. 조립화 장치는 제어 시스템을 이용하여 교반속도를 0~50 rpm으로, 회전 각도를 0~90°로, 교반 방향을 좌/우로 변경 할 수 있도록 제작하였다. 예비 실험을 통하여 비료 조립화를 위한 교반 속도는 25 rpm, 회전 각도는 45℃, 교반 방향은 위에서 좌로 회전하도록 설정하였다.

2.3. 혼합 및 조립화

비료 조립을 위하여 부산재의 함유량을 40% 이상일 경우 (Table 1, 실험조건 번호 1-23번)와 함유량 40% 미만일 경우

Table 1. Mixing ratios of raw materials and granulation results (Fly ash content > 40%)

Trial No.	Mixing weight (g)					Weight of formed particles (g) (2~4 mm)	Granulation rate (%)
	Fly ash	Kaolin	Bentonite	Silica sand	Urea		
01	200	-	-	-	-	-	0
02	180	20	-	-	-	-	0
03	180	-	20	-	-	-	0
04	180	-	-	20	-	-	0
05	160	40	-	-	-	-	0
06	160	-	40	-	-	-	0
07	160	-	-	40	-	-	0
08	140	60	-	-	-	-	0
09	140	-	60	-	-	-	0
10	140	-	-	60	-	-	0
11	120	80	-	-	-	-	0
12	120	-	80	-	-	-	0
13	120	-	-	80	-	-	0
14	200	-	-	-	50	3.8	1.5
15	180	20	-	-	50	6.8	2.7
16	180	-	20	-	50	15.2	6.1
17	180	-	-	20	50	42.6	17.0
18	140	60	-	-	50	35	14.0
19	140	-	60	-	50	54.9	22.0
20	140	-	-	60	50	84.8	33.9
21	100	100	-	-	50	90.4	36.2
22	100	-	100	-	50	79.2	31.7
23	100	-	-	100	50	134.1	53.6

Table 2. Mixing ratios of raw materials and granulation results (Fly ash content < 40%)

Trial No.	Fly ash content (%)	Mixing weight (g)			Weight of formed particles (g) (2~4 mm)	Granulation rate (%)
		Fly ash	Silica sand	Urea		
a	0	0	200	50	244.2	97.7
b	3	7.5	192.5	50	239.3	95.7
c	7	17.5	182.5	50	240.3	96.1
d	9	22.5	177.5	50	221.4	88.6
e	15	37.5	162.5	50	205.8	82.3
f	30	75	125	50	185.71	74.3

(Table 2, 실험조건 번호 a-f)로 나누어 실험을 진행하였으며, 매 실험 시 조립을 위해 혼합된 재료의 총량이 250 g이 되도록 하였다. 그 중 요소를 50 g으로 고정하여 요소의 중량이 20%가 되도록 하였다. 요소의 중량을 20%로 고정한 이유는 실제 비료공장에서는 비료 생산 시 총 중량의 20% 정도로 요소를 혼합하여 제작하기 때문이다.

비료의 조립화를 위해 먼저 부산재와 각 광물질을 혼합 비율에 따라 전자저울(Shimadzu, AUX220, Japan)을 이용하

여 정확히 취한 후 실험 장치에서 1분간 교반하며 혼합하였다. 다음으로 혼합된 시료에 물을 5~7회 분사하며 응집을 유도하였다. 응집된 시료를 1분 이상 교반하여 입자가 구형을 형성하기 시작하면 가스토치를 이용하여 3~5분간 열을 가하여 수분을 제거하며 조립화 하였다. 충분한 열이 가해지지 않으면 입자간의 엮힘 현상이 발생하거나 강도가 낮아 비료가 형성되지 않을 수 있기 때문에 충분한 열을 가하였다. 조립된 입자는 2~4 mm 체 거름을 실시한 후 2 mm 미만의 입자는 위 과정으로 조립화를 반복 실시하였다.

2.4. 분석 방법

조립된 비료는 일정 강도를 유지해야하므로 비산재로 조립된 비료를 강도측정계(OKKO-LSD20FGN)로 측정하였다. 입자강도는 각 조립화 실험시 무작위로 추출한 5개의 시료에 대해 측정하였다. 조립된 비료의 물성은 전계방사형주사전자현미경(FE SEM, JEOL JSM-6701F, USA)과 X-선회절분석기(XRD DE/D-5005, Siemens, Germany)를 이용하여 분석하였다.¹⁵⁾ 중금속(As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) 분석은 폐기물공정시험기준과 토양오염공정시험기준의 금속류 유도결합플라즈마-원자발광분광법으로 ICP-OES (Varian/720-ES)를 이용하여 측정하였다.¹⁴⁾ 표준시약은 ICP multi-standard solution과 Arsenic ICP standard를 이용하였다.

폐기물공정시험기준에 따른 분석은 전처리 방법에 따라 1 L 용량플라스크에 비료 100 g을 넣고 표전까지 증류수를 채운 후 진폭이 5 cm인 진탕기(DAIHAN, SHR-2D)에서 진탕 횟수 200 rpm으로 하여 6시간 진탕한 후에 1.0 µm 유리섬유 여과지로 여과 후 여과액을 분석하였다. 토양오염공정시험기준에 따른 분석은 질산-염산 분해법을 이용하여 킬달플라스크에 비산재 3 g과 진한 질산, 염산(1+1)을 이용하여 용액을 제조하였다. 전처리 방법은 폐기물공정시험기준과 동일방법을 사용하였다.¹⁶⁻¹⁸⁾

3. 결과 및 고찰

3.1. 비산재를 주원료로 비료 제작

비료 제작에 앞서 비산재의 특성을 분석하였다. 비산재는 출구온도 850℃ 이상의 소각로에서 발생하므로 수분함량이 1%로 낮았고, 입자크기는 평균 0.8 µm로써 작은 입자의 분말 형태이었다. A 소각장 비산재에는 P₂O₅가 24.54% 함유되어 있어 문헌조사에서 나타난 다른(생활하수슬러지 외 다른 종류의 슬러지 유입) 비산재의 P₂O₅ 함량(1~15%)⁵⁾보다 높았다. A 소각장의 비산재에는 P₂O₅ 외에 CaO 15.20%, MgO 2.58%, K₂O 2.47% 등이 포함되어 국내에서 제조되고 있는 비료의 일반적인 구성성분과 비교해 보았을 때 유사한 성분을 나타내었다.¹⁹⁾ 비료의 일반적인 구성성분은 N 12%, P 7%, K₂O 9%, MgO 2% 등으로 구성이 되어 있다.

비산재를 비료 조립시 주원료로 사용하기 위해 투입량을 40% 이상으로 한 혼합조건에 따른 조립결과는 Table 1에

나타내었다. 요소를 투입하지 않은 실험조건(No. 01~13)에서는 2 mm 이상 크기의 입자가 생성되지 않았다. 이는 요소를 투입하지 않은 경우 화학적 결합을 유도하지 않기 때문에 입자가 형성되지 않은 것으로 판단된다. 요소를 투입한 No. 14~23 실험에서는 비료의 조립화율이 1.5~53.6%를 나타내었다. 요소가 1,300℃의 열에 녹은 후 응고되면서 입자 간에 화학적 결합을 유도하기 때문으로 판단된다.

원료혼합조건 중 보조제 별 조립율을 확인한 결과, 입자크기가 1~10 µm 사이 인 카올린과 벤토나이트를 사용한 경우보다 입자크기가 0.15 mm인 규사를 사용 했을 경우에 조립화율이 높았다. 이는 입자 형성 시 구심점의 역할을 할 수 있는 입자크기가 필요하기 때문으로 판단된다. 또한 혼합재 중 비산재의 비율이 낮아질수록 입자 생성률이 높아지는 결과를 보아 비산재의 투입량이 적고 보조제 중 규사를 이용할 경우에 비료의 조립화율이 높게 나타나는 것을 확인하였다.

3.2. 비산재를 보조원료로 비료 제작

혼합시 비산재를 40% 이상 함유시켜 실험한 결과 비산재의 함유량을 낮게 하고 규사를 이용하여 비료를 제작한 경우 조립화율이 올라가는 것을 확인하였다. 따라서 비산재의 함유량을 40% 이하로 하여 규사와 비료 조립화 실험을 실시하였다. Table 2는 비료 제작시 비산재를 보조원료(투입량 40% 이하)로 혼합한 조건에 따른 조립결과이다. 실험 결과, 비산재를 0~15% 혼합한 a~e의 실험에서 조립화율이 82.3~97.7%로 80% 이상의 입자 생성률을 보였다. 하지만 비산재를 30% 이상 혼합한 f의 실험에서는 시료를 조립하였을 때는 입자 생성율이 80% 이하로 떨어졌다. 이는 비산재를 주원료로 한 실험과 같이 비산재의 함량이 높아질수록 입자의 구심점 역할을 할 수 있는 보조제의 함량이 낮아지기 때문으로 판단된다.

비산재의 함유량이 40% 이상인 비료는 일정한 강도를 지니지 않고 입자 형태를 유지하기 힘들었으나, 비산재의 함유량이 40% 이하인 비료는 형태를 장기간 유지하였다. 이는 규사를 구심점으로 하여 생성된 입자가 요소로 인해 화학적 결합을 진행한 것으로 판단된다. Fig. 1은 생성된 입자의 입자강도를 측정한 결과이다. 입자강도 측정 결과 a~f의

Fig. 1. Particle strength of the produced fertilizers in this study (n = 5, average value, standard deviations).

시료 모두 평균 3 kg/cm^2 이상의 강도를 나타냈으며, 비산재를 넣지 않은 a 실험의 강도(평균 5.27 kg/cm^2)가 가장 높았다. 비료조립화시 필요한 강도가 3 kg/cm^2 이므로 a~f의 혼합조건 모두 비료화가 가능한 것으로 나타났다.

3.3. 조립된 비료의 물성분석

비산재 함유율 30% 이하 실험의 혼합 조건에 따라 생성된 비료의 물성분석을 위하여 SEM (Scanning Electron Microscope), EDS (Energy Dispersive Spectroscopy), XRD (X-ray Diffraction)를 측정하였다.

Table 3은 조립화한 비료의 EDS 측정 결과이다. 측정결과, 비산재의 함량이 0%인 경우 인의 함량은 3.17%이었고, 비산재의 함량이 높아질수록 인의 함량이 높아져 비산재 30%의 경우 인의 함량이 16.08%로 분석되었다. 질소의 경우 비료 조립 시 첨가한 요소(20%로 첨가)에 의해 비산재

주입량에 관계없이 질소분석결과가 21.1~22.8%로 유사하게 나타났다. Al, K, Ca 등 기타 성분은 혼합재에 포함된 미량 성분이거나 SEM과 EDS 분석 시 표면처리한 Pt 때문에 나타난 것으로 판단된다.

Fig. 2는 비산재를 3% 함유한 b 실험과 7% 함유한 c 실험 시료의 SEM 사진(1,000배 확대)이다. SEM 결과를 통해 규사의 입자가 직방형을 나타내고 있으며 비산재는 구형을 이루고 있는 것을 확인하였다. 또한 비산재의 함유량이 높아 질수록 직방형 규사에 구형 비산재가 표면에 부착하는 것을 확인하였다.

Fig. 3은 조립화한 비료의 XRD 분석 결과를 비산재의 함유량(3%, 7%)에 따라 나타낸 것이다. 모든 시료에서 비산재의 함유량에 관계없이 같은 성분이 검출되었으며 주로 P_2O_5 , K_2O , CaO , MgO 등이 포함되어 있는 것을 정성적으로 확인하였다.

Table 3. EDS analysis results of the fertilizers produced with fly ash

Trial	O	N	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	Fe	Total
b	49.80	21.92	0.33	2.83	7.56	4.08	2.47	2.59	3.90	2.10	0.50	1.92	100%
c	49.08	24.04	0.39	2.62	4.67	5.37	2.13	5.62	3.45	1.63	0	1.00	100%
d	48.57	21.12	0.72	2.54	3.30	8.13	2.41	2.32	6.58	2.40	0	1.91	100%
e	49.55	21.80	0.58	2.07	3.03	9.54	2.23	2.28	4.32	2.26	0.35	1.99	100%
f	50.91	22.81	0.30	1.19	1.34	16.08	0.88	2.81	3.68	0	0	0	100%

Fig. 2. SEM results of the fertilizer produced with fly ash 3% (a) and 7% (b).

Fig. 3. XRD analysis results of the fertilizer produced with fly ash.

Table 4. Heavy metal analysis results of fertilizers made with fly ash by korean standard methods for solid wastes

Trial	Elemental analysis (mg/L)						
	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
a	0.16	0.03	0.49	1.13	0.28	0.27	1.81
b	0.21	0.08	0.55	1.58	0.31	0.65	2.44
c	0.27	0.11	0.66	1.72	0.31	0.96	2.79
d	0.36	0.14	0.76	2.19	0.36	1.31	3.39
e	0.50	0.17	0.93	2.76	0.38	1.91	3.86
f	1.05	0.30	1.82	5.74	0.76	3.53	6.54
Risk limit	50	5	300	300	50	50	900

Table 5. Heavy metal analysis results of fertilizers made with fly ash by korean standard methods for soils

Trial	Elemental analysis (mg/kg)						
	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
a	7.87	1.67	41.8	54.96	13.05	2.08	109.58
b	14.57	3.81	131.9	71.88	14.13	18.39	246.16
c	18.34	5.53	156.3	92.95	18.23	25.26	348.17
d	21.75	7.00	190.6	124.11	25.55	31.99	474.05
e	31.24	9.18	219.8	194.54	35.01	49.32	718.98
f	32.44	17.69	421.55	397.12	75.29	100.78	1393.31
Risk limit	50	5	300	300	50	150	900

3.4. 조립된 비료의 중금속 용출 및 함량 분석

비산재를 보조제로 활용해 조립된 비료의 중금속 용출을 평가하기 위하여 폐기물 공정시험기준에 따라 분석하였다 (Table 4). 위해성 기준은 비료의 중금속 기준을 적용하였다. 중금속 용출시험에서는 비산재 함유량에 관계없이 모든 시료가 중금속 항목의 위해성 기준을 초과하지 않았다.

다음으로 조립된 비료의 중금속 함량을 측정하기 위하여 토양오염공정시험기준에 따라 분석하였다 (Table 5). 분석 결과, 비산재를 3% 함유한 비료는 중금속 위해성 기준을 초과하지 않았으나, 비산재 함유량이 7% 이상 인 비료에서는 위해성 기준을 초과하는 항목이 나타났다. 비산재 함유량 7%인 비료의 경우 Cd 수치가 5.53 mg/kg로 위해성 기준을 초과하였다. 비산재를 30% 함유한 경우 Cd이 17.69 mg/kg, Cr은 421.55 mg/kg, Cu 397.12 mg/kg, Ni 75.29 mg/kg로 중금속 기준을 초과하였다. 함량시험 결과를 기준으로 볼 때, 비료제작시 비산재를 보조원료로 투입할 경우 함유량 7% 이하로 투입하는 것이 바람직하다. 비산재의 함유량을 늘리기 위해서는 비산재 내의 중금속에 대한 정밀한 분석과 전처리를 통한 제거가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

생활하수슬러지만 소각하는 시설에서 발생된 비산재를 이용하여 비료 제조시 주원료 및 보조원료로 사용하기 위해 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 비산재는 충분한 인을 함유하여 비료의 원료로 사용될 수 있으나, 0.8 μm 의 미세입자로서 조립을 위한 입자상 물질의 주입 없이는 조립화가 불가능하다. 또한 비산재를 주원료(40% 이상 포함)로 비료를 제작할 경우 조립화율(2-4 mm 입자 형성률) 55% 이상을 달성할 수 없었다.

2) 비료 제조시 비산재를 보조원료로 첨가하여 사용할 경우, 비산재 함유량을 15% 이하로 유지하면 조립화율 80% 이상 달성할 수 있었다. 다만 입자의 구심점이 되는 물질에 부착 시기기 위해서는 화학적 결합을 유도하는 물질이 필요하다.

3) 비산재를 보조원료로 조립화된 비료의 중금속 분석결과 폐기물공정시험기준인 용출시험에서는 위해성이 없는 것으로 나타났다. 그러나 토양오염공정시험기준 상으로는 비산재 함유량이 높아짐에 따라 카드뮴 등 중금속 위해성을 초과하는 항목이 발생되었다. 따라서 비료제작시 비산재를 보조원료로 투입할 경우 비산재 함유량을 7% 이하로 유지하는 것이 바람직하다. 비산재의 함유량을 늘리기 위해서는 비산재 내의 중금속에 대한 정밀한 분석과 전처리를 통한 제거가 필요할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

본 연구는 한국산업단지공단 울산지역본부 울산EIP사업단의 생태산업단지 구축사업(EIP-2014-11-1087), 환경부의 토양지하수오염방지기술개발사업(2015000560002), 국가과학기술연구회 융합연구사업(20156601)의 지원으로 수행되었습니다.

KSEE

References

1. Korea Ministry of Environment., "Sewer statistics,"(2011).
2. Korea Ministry of Environment., "Sewer statistics,"(2014).
3. Kim, S. W. and Yoo, H. C., "Melting Characteristics of Bottom Ash and Fly Ash from Municipal Solid Waste Incineration," *J. Korean Environ.*, **24**(5), 801~812(2002).
4. Kishor, P., Ghosh, A. K. and Kumar, D., "Use of Flyash in Agriculture: A Way to Improve Soil Fertility and its Productivity," *Asian J. Agric. Res.*, **1**(14), 1819~1894(2010).
5. Kim, S. B., Jwa, S. M., Moon, D. K., Han, H. R. and Chung, J. B., "Effects of Source and Application Rate of Phosphours on Growth and Arbuscular Mycorrhizae Formation of Trifoliolate Orange in Volcanic Ash Soil," *J. Korean Environ. Agric.*, **19**(3), 206~212(2000).
6. Min, J. H., Cho, H. Y. and Park, J. W., "Research on heavy metal stabilization of incinerator bottom ash through the process simulation," *J. Korean Recy.*, P1-05(2012).
7. Oh, S. J., Yun, H. S., Oh, S. M., Kim, S. C., Kim, R. Y., Seo, Y. H., Lee, K. S., Ok, Y. S. and Yang, J. E., "Effect

- of Fly Ash Fertilizer on Paddy Soil Quality and Rice Growth,” *J. Appl. Biol. Chem.*, **56**(6), 229~234(2013).
8. Choi, W. J., Park, K. M., Yoon, B. J., Kim, M. C. and Oh, K. J., “Recovery of Presource from Sewage Sludge by a Struvite-forming Method,” *J. Korean Environ.*, **31**(7), 557~564(2009).
9. Capp, J. P., “Power Plant Flyash Utilization for Land Reclamation in the Eastern United States. In: Reclamation of Drastically Disturbed Lands, Schaller,” F.W. and P. Sutton (Eds.). Madison, WI., ASA., pp. 339~353(1978).
10. Adriano, D. C., Page, A. L., Elseewi, A. A., Chang, A. C. and Straugham, I., “Utilization and disposal of fly-ash and coal residues in terrestrial ecosystem: A review,” *J. Environ. Qual.*, **9**, 333~344(1980).
11. Buck, J. K., Honston, R. J. and Beimbom, W. A., “Direct seedling of anthracite refuge using coal flyash as a major soil amendment” *Proceedings of the Mining and Reclamation Conference and Exhibition, April*, **23**(26), 213~219(1990).
12. Aitken, R. L., Campbell, D. J. and Bell, L. C., “Properties of Australian fly ash relevant to their agronomic utilization,” *Aust. J. Soil Res.*, **22**, 443~453(1984).
13. Cerevelli, S., Petruzzelli, G., Perna A. and Menicagli, R., “Soil nitrogen and fly ash utilization: A laboratory investigation,” *Agrochimica*, **30**, 27~35(1986).
14. Cetin, S. and Pehlivan, E., “The use of flyash as a low cost, environmentally friendly alternative to activated carbon for the removal of heavy metals from aqueous solutions,” *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects*, **298**, 83~87(2007).
15. Jang, S. K., Choi, D. I., Lim, C. H. and Lee, J. S., “Chemical Analysis of Fly Ashes from Municipal Solid Waste Incinerators,” *J. Anal. Sci. Technol.*, **13**(2), 215~221(2000).
16. Lee, W. K., Kim, J. S. and Kim, J. B., “Fractionation and Leaching Properties of Heavy Metals in Fly Ashes from three MSW Incinerators,” *J. Korean Environ.*, **20**(3), 421~431(1998).
17. Kim, H. J., Kim, N. W., Ko, Y. Z. and Bae, J. S., “Fundamental Research on the Applying to Construction Materials of MSWI fly-ashes,” *J. Korean Sci. Civi. Eng.*, **10**, 3103~3108(2004).
18. Jang, S. K., Choi, D. K., Lim, C. H. and Lee, J. S., “Chemical Analysis of Fly Ashes from Municipal Solid Waste Incinerators,” *J. Korean Anal. Sci.*, **13**(2), 215~221(2004).
19. Kim, S. B. and Lee, W. T., “Characterization of Fly Ash Produced from a Sewage Sludge Incineration Facility in Korea,” *J. Korean Environ.*, **38**(2), 96~99(2016).