

Article

<https://doi.org/10.7745/KJSSF.2017.50.2.127>

pISSN : 0367-6315 eISSN : 2288-2162

Coal Bottom Ash Application on Park Site Soil and Its Impacts on Turfgrass Growth and Soil Quality

Se Jin Oh* and Yong Hyok Kim*

Coal Ash Recycling Research Center, Yeongheung Power Division, Korea South-East Power Co., Incheon 23120, Korea

*Corresponding author: ohsj79@koenergy.kr, yhkim@koenergy.kr

ABSTRACT

Received: March 22, 2017

Revised: April 27, 2017

Accepted: April 27, 2017

Bottom ash (BA) has different macro- and micronutrients such as B, Mo, Fe, Ca, and Mg, providing useful resources for plant growth and soil quality. The objective of this study was to evaluate the applicability of artificial top-soil treated with BA in park area as a vegetation base material, especially for turfgrass growth. Collected BA was mixed with peat moss and clay at the ratio of 70:10:20 (w/w). In order to evaluate the park quality and turfgrass growth in park area, the artificial soil was applied with BA along with the control or without BA. Result showed that exchangeable K and P were increased by 11.4 mg kg⁻¹ and 163 mg kg⁻¹, respectively, compared to the control soil when the artificial soil was treated with BA. Microbial population and enzyme activity (Acid-phosphatase, APA) in artificial soil having BA also increased as 2 times and 10%, respectively, compared to the control soil. Comparing turfgrass growth and yield between general soil and artificial soil, about 2 times higher plant yield (fresh weight) was observed as artificial soil was applied comparing to general soil. Furthermore, nutrient concentration in turfgrass was averaged as 0.440% for P₂O₅, 0.456% for CaO, 1.198% for K₂O and 0.188% for MgO that all values are higher than general soil (0.323% for P₂O₅, 0.416% for CaO, 0.610% for K₂O and 0.173% for MgO). Application of BA can be useful for vegetation base material in park site.

Keywords: Artificial soil, Bottom ash, Park site, Soil quality, Turfgrass

Variation of physico-chemical and biological properties in the field microcosm testbed as affected by artificial soil manufactured with coal bottom ash.

Chemical	pH	EC	Avail. P ₂ O ₅	Ex. ^z Ca	Ex. K	Ex. Mg
	1:5	dS m ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹
Park soil	6.36	0.24	69.0	69.3	8.87	13.3
Bottom ash	6.27	0.32	232	76.2	20.3	16.6
Physical	Water content	Pore interval	Pore area	Soil hardness		
	%	mm	mm ²	mm		
Park soil	19.4	0.70	0.32	21.3		
Bottom ash	22.6	1.54	7.22	13.0		
Biological	MP ^y	UA ^x	DHA ^w	APA ^v		
	CFU	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹		
Park soil	2.2*10 ⁶	65.3	79.6	385		
Bottom ash	4.8*10 ⁹	66.1	83.9	424		



Introduction

전세계 대부분의 국가들은 전력생산을 위한 수단으로 석탄화력발전에 대한 의존도가 높으며, 이에 따라 발전연료인 석탄의 소비량은 지속적으로 증가하고 있는 실정이다(Gupta et al., 2007; Kim et al., 2014b; Oh et al., 2013). 이에 따라 화력발전소의 주연료인 석탄이 연소되고 발생하는 석탄회(Coal ash)의 발생량도 지속적으로 증가하는 추세에 있으며, 국내의 경우 석탄화력발전으로부터 연간 850만톤 가량의 석탄회가 발생하고 있는 실정이다(Kim et al., 2014b; Park et al., 2012). 화력발전소에서 발생하는 석탄회는 일반적으로 보일러 상부로 비산되어 포집되는 비산재(Fly ash)와 보일러 하부로 낙하되어 포집되는 바닥재(Bottom ash)로 구분되고, 발생량은 각각 80~85%와 15~20% 정도를 차지하고 있다. 석탄회 발생량 증가는 질소산화물(NO_x)의 대기배출기준 준수를 위한 연소조건 악화(불완전 연소), 연료비 절감을 위한 저가의 고회분탄(불량역청탄) 사용량 증대, 토목·건설 분야의 제한적인 사용과 같은 원인에 있다. 본 연구가 수행된 한국남동발전 영흥발전본부의 경우 수도권 전력의 25%를 담당하는 대규모 화력발전소이지만, 수도권과 인접한 위치적인 요인에 따른 제약으로 석탄회 발생량은 증가하고 재활용률은 저조한 실정이다. 이는 대기 오염물질 배출량 저감을 위한 불완전연소 등에 의한 발생량 증가와 민원 발생 부담감에 따른 매립회 재활용 곤란 등을 꼽을 수 있다. 영흥발전본부의 경우 ‘16년 기준 보유 중인 회처리장(Ash pond)의 가용용량의 80%정도 매립 중이고, 재활용률 [55%('14) → 58%('15)]이 소폭 증가하고 있는 추세이지만 발생량 [106만톤('14) → 143만톤('15)] 또한 크게 증가하는 추세로 석탄회의 재활용 방안이 시급히 마련되어야 하는 실정이다(Kim, 2016). 석탄회 재활용은 대부분의 국가에서 시멘트 원료와 관련된 건축, 토목, 도로 분야에 주로 사용되고 있으며, 국외의 경우 석탄회가 폐기물로 지정되어 있으나 유용자원(Beneficial use) 기준에 충족할 경우 농업용, 광해방지용 및 원예/조경용 등에도 재활용할 수 있는 방안이 마련되어 있다. 하지만 우리나라는 석탄회 재활용과 관련하여 폐기물관리법, 자원의 절약과 재활용촉진에 관한 법률, 철강슬래그 및 석탄재 배출사업자의 재활용 지침, 농지법 등에서 재활용을 권장하고 있지만 현실적으로 폐기물이라는 인식 때문에 건축, 토목 등 일부 분야에서만 사용되고 있는 실정이다(Karmakar et al., 2010; Thind et al., 2012). 석탄회는 일반적으로 화학적 특성이 SiO_2 , Al_2O_3 등이 70% 이상을 차지하고 있으며, 이는 토양의 구성과 매우 유사한 것으로 농업용, 원예/조경용으로 활용가치가 높은 물질이다. 또한, 연소과정에서 용해되었던 Alumino-silicate 구형이 식으면서 고형화되고, 이때 기체에 분산되어 있는 B, Mo, Fe, Ca, K 및 Mg 등이 고체 표면에 흡착된다(Sharma et al., 2012). 고체 표면에 흡착된 화합물들은 수용성 염류형태로 존재 할 경우 주변 환경으로 쉽게 용출되어 토목, 건축 이외의 분야에 적용할 경우 개량제로의 활용이 가능하다(Oh et al., 2013; Sajwan et al., 2003). 이러한 석탄회의 우수한 특성을 이용하여 토양 물리·화학·생물학적 특성 개선, 식물생육환경 개선 및 식물영양소 공급원 등으로 활용한 연구가 다수 진행된 상태이다(Lee et al., 2005; Park et al., 2012; Patra et al., 2012). 본 연구는 석탄화력발전소에서 발생하는 바닥재를 이용하여 제조한 인공토양을 공원부지, 체육부지 등의 식생기반재로 활용방안 확대를 위해 실시하였고, 제조한 인공토양을 실제 공원부지 토양에 처리하고 토양의 물리·화학·생물학적 특성 변화 및 식생의 생육에 미치는 영향을 평가하였다.

Materials and Methods

공시재료 및 현장시험구 시험에 사용한 식생기반용 인공토양은 바닥재, 피트모스, 점토를 70:10:20 (w/w, %)의 비율로 혼합하여 제조하였다. 인공토양에 사용한 바닥재는 한국남동발전 영흥발전본부에서 건식공정으로 발생하

는 3~6 mm 사이즈를 사용하였고, 피트모스와 점토는 시중에서 원예용으로 판매되는 것을 구매하여 사용하였다. 현장시험은 영흥발전본부 내 생태공원 부지에서 바닥재 활용 인공토양과 일반토양(시험포장에서 굴착한 토양) 시험구로 각각 56 m² (7 m * 8 m)의 규격으로 구성하였다. 시험구 구성은 시험부지 토양을 0.15 m 굴착 후 인공토양과 일반토양을 포설하였고, 다짐 작업 후 들잔디 (*Zoysia japonica* Steud.)를 뗏장 (0.4 m * 0.4 m)으로 이식하여 완공하였다. 인공토양의 식생기반재 활용 효율성은 2016년 6월부터 11월까지 6개월 간 모니터링 하였다. 인공토양 제조에 사용한 바닥재의 화학적 조성 분석은 XRF (Rigaku, ZSX-100e, Japan)를 이용하였고, pH 및 EC 등의 화학적 특성은 NIAST (2000)에 준하여 측정하였다. 또한, 중금속 함량은 토양오염공정시험기준 (ME, 2010)에 준하여 왕수 (aqua regia)로 추출한 후, ICP (Inductively Coupled Plasma, Thermo, iCAP 6000 series)를 이용하여 분석하였다.

잔디생육 및 잔디품질 평가 생태공원 부지에 구성한 인공토양 시험구 (실험구)의 잔디 생육 개선 효율성은 일반토양을 적용한 시험구 (대조구)와 비교하여 평가였다. 평가 항목은 잔디의 생육기간 중 줄기, 뿌리의 길이를 현장에서 4회 측정하였고, 시험 완료 후 0.9 m² (0.3 m * 0.3 m) 당 생산량 (생중량 및 건중량)을 측정하여 단위면적 (1ha) 당 생산량으로 환산하였다. 또한, 채취한 잔디가 함유하는 Ca, Mg, K 등의 영양원소와 As, Cd, Pb 등의 중금속 함량을 건조한 잔디를 습식분해 (HNO₃-H₂O₂, Microwave digestion)하여 ICP로 정량하였다 (RDA, 2000).

토양질 평가 현장에 구성한 시험구로부터 모니터링 기간 동안 채취한 토양은 물리성, 화학성 및 생물학적 특성 등 바닥재로 제조한 인공토양이 토양질 (Soil quality)에 미치는 영향을 평가하였다. 토양의 물리성은 통기성, 답압 등을 평가하기 위해 코어 샘플링 한 시료를 현미경을 이용하여 이미지 관찰을 통하여 공극크기와 면적을 측정하였고, 토양단면의 경도를 아마나카식 토양경도계를 이용하여 현장에서 측정하였다. 토양 화학성은 pH, EC, 양분함량 등을 토양화학분석법 (NIAST, 2000)의 시험방법에 준하여 분석하였다. 중금속 함량은 토양오염공정시험기준 (ME, 2010)에 준하여 전함량 (Aqua regia)으로 측정하였다. 토양의 생물학적 특성은 미생물 개체수 (Microbial population), 효소 활성도 (Enzyme activity)를 분석하였다 (Oh, 2015). 미생물 개체수 분석은 TSA (Tryptic soy agar)와 PDA (Potato dextrose agar)를 혼합한 배지에 배양액을 주입하여 2-3일간 건조시키는 희석 평판법 (Dilution plate method)으로 하였다. 효소 활성도는 탈수소 효소 (Dehydrogenase, DHA), 인산가수분해 효소 (Acid-phosphatase, PA), 요소가수분해 효소 (Urease, UA)를 분석하였다 (Koo et al., 2012; Lee et al., 2011).

통계분석 바닥재로 제조한 인공토양을 식생기반재로 활용하였을 때 잔디의 생육 및 토양질에 미치는 영향은 SPSS (ver. 20)를 이용하여 통계분석 하였고, 시험구 간 유의성은 one-way ANOVA (95% significance level)로 검정하였다.

Results and Discussion

공시재료 특성 분석결과 본 연구에서 현장시험이 수행된 대조구 토양 및 인공토양 제조에 사용한 바닥재의 화학적 특성은 Table 1과 같이 나타났다. 대조구의 pH는 6.12로 약산성 특성을 보였으며, 인산 등 양분함량은 일반적인 농경지 토양에 비해 대체적으로 낮은 수준을 보였다. 토양의 중금속 함량은 토양환경보전법에서 정하는 공원부지 (1 지역) 기준치를 만족하는 것으로 나타났다. 바닥재의 pH는 7.29로 약알칼리성 특성을 나타냈으며, 전기전도도는 식

물 생육에 영향을 미치지 않는 수준인 0.82 dS m^{-1} 로 분석되었다. 양분원소의 경우 인산 141 mg kg^{-1} , 교환성 칼슘 720 mg kg^{-1} , 교환성 마그네슘 250 mg kg^{-1} 으로 토양질 개선에 이점이 있을 것으로 판단된다. 이러한 결과는 바닥재의 원소분석 결과 SiO_2 (56%), Al_2O_3 (26%), Fe_2O_3 (6%) 등이 80% 이상, CaO (6.5%), K_2O (1.2%), MgO (1.1%), P_2O_5 (0.6%) 등 식물영양소도 다량 함유하는 결과와 일치하였다. 또한, 바닥재가 함유하는 중금속의 경우도 토양환경보전법 1지역 기준을 만족하는 수준으로 식생기반재로 활용이 가능한 수준으로 나타났다.

Table 1. Chemical properties and heavy metal concentrations in park soil and coal bottom ash.

Sample	pH	EC	Avail. P_2O_5	Ex. ^z Ca	Ex. K	Ex. Mg
	1:5	dS m^{-1}	mg kg^{-1}	mg kg^{-1}	mg kg^{-1}	mg kg^{-1}
Park soil	6.12	0.29	89.0	59.8	10.8	10.9
Bottom ash	7.29	0.82	141	720	50.2	250
Sample	As ^y	Cd	Cu	Pb	Zn	Hg
	mg kg^{-1}	mg kg^{-1}	mg kg^{-1}	mg kg^{-1}	mg kg^{-1}	mg kg^{-1}
Park soil	0.46	0.31	14.9	15.4	64.2	ND
Bottom ash	12.5	0.60	17.8	11.7	32.7	0.12

^z Ex.: Exchangeable concentration (1 N Ammonium acetate extraction; NIAST, 2000)

^y Total concentration (Aqua regia extraction; ME, 2010)

잔디 생육 및 품질 시험 결과 실험구에서 생육한 잔디의 생육량 및 생산량 변화는 Fig. 1과 같이 나타났다. 잔디의 뿌리 및 줄기 길이는 최종 모니터링 시점에서 일반토양 시험구 100 cm unit^{-1} 과 $64.8 \text{ cm unit}^{-1}$ 대비 인공토양 시험구 151 cm unit^{-1} 과 107 cm unit^{-1} 으로 50%와 66% 생육이 유의하게 증가하는 것으로 나타났다 (Fig. 1-(a), (b)). 특히, 실험구에서 생육한 잔디 뿌리의 초기생육(7월)은 2배 이상 (일반토양 $41.2 \text{ cm unit}^{-1}$ → 인공토양 $98.5 \text{ cm unit}^{-1}$) 대조구보다 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 식생기반재의 처리 위치가 잔디의 뿌리와 직접 접하는 부분으로 초기 생육 단계에서 바닥재에 함유된 영양원소에 민감하게 반응하며 나타난 것으로 보이며, 특히 바닥재에 다량 함유된 철의 영향을 받아 초기 생육이 활발하게 진행된 것으로 판단된다 (Kim et al., 2014a; Ma et al., 2013). Fig. 1-(c)는 현장 시험구에 식재한 잔디의 6개월 생육 후 생산량을 보여준다. 대조구에서 수확한 잔디 생산량은 생중량과 건중량이 $2,589 \text{ kg ha}^{-1}$ 와 969 kg ha^{-1} 였고, 실험구의 경우 $5,222 \text{ kg ha}^{-1}$ 와 $2,233 \text{ kg ha}^{-1}$ 으로 2배 정도 유의하게 증가하는 것으로 조사되었다. 이러한 결과는 석탄회를 개량제로 사용한 Ma et al. (2013)과 Oh et al. (2013)의 선행연구에서도 유사한 결과를 보였고, 각각 부들과 벼의 생육 및 생산량이 증가한다는 결과와 일치하는 것으로 나타났다. 또한 현장 시험구에서 생육한 잔디는 육안관찰 결과 생육기간 동안 병해는 발견되지 않았고, 이는 철의 식물 독성 농도를 $1,000 \text{ mg kg(L)}^{-1}$ 수준으로 보고한 Ma et al. (2013)의 결과에 따른 것으로 판단된다. 현장 시험구에서 수확한 잔디가 함유하는 영양원소 및 중금속 함량은 Table 2와 같이 나타났다. 잔디의 영양원소 분석결과 모든 분석항목은 대조구에 비해 실험구에서 수확한 시료에서 증가하였고, 특히 인과 칼륨이 대조구에 비해 3배와 2배 유의하게 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 석탄회를 토양에 처리하였을 때 식물영양소 제공에 효과적이라고 보고한 선행연구와 일치하였고, 석탄회를 사용하여 연구한 선행연구 사례에서 나타나듯 B, Mn 등의 미량 영양원소 제공에도 효과적일 수 있을 것으로 판단된다 (Oh et al., 2013; Pandey et al., 2009; Thind et al., 2012). 잔디의 유해성분 분석결과 잔디가 흡수한 비소와 아연은 실험구에서 대조구보다 흡수량이 유의하게 감소하였다. 또한 카드뮴, 구리, 납 등은 통계적으로 유

의하지 않지만 대조구보다 낮은 수준의 흡수량을 보였다. 이는 인공토양의 제조에 사용한 바닥재에 의한 영향으로 보이며, 단순 흡착 (Adsorption)이나 방출된 칼슘 등과의 공침 (Co-precipitation)에 의한 결과로 판단된다 (Brady and Weil, 2010; Gupta et al., 2007; Pandey et al., 2009).

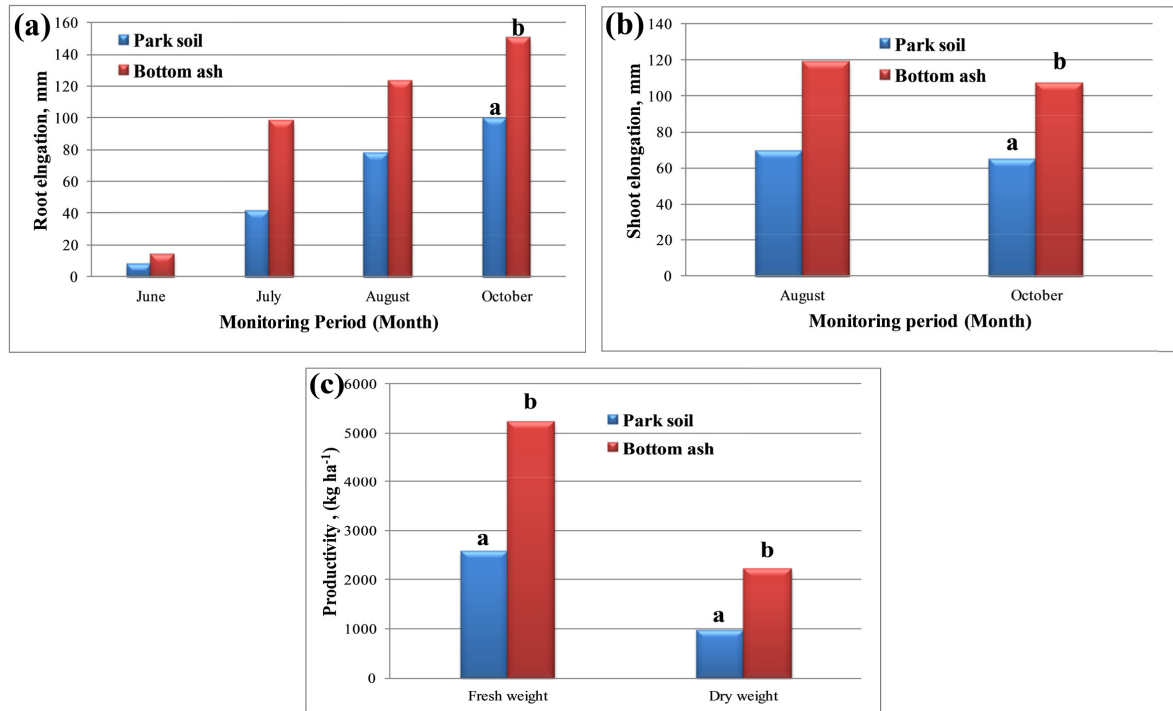


Fig. 1. Variation of turfgrass elongation ((a)-root, (b)-shoot) and productivity (c) in the field microcosm testbed as affected by artificial soil manufactured with coal bottom ash (Different letter indicates significant differences at $p < 0.05$ level).

Table 2. Concentration of macronutrient and heavy metal in the turfgrass as affected by artificial soil manufactured with coal bottom ash (Different letter indicates significant differences at $p < 0.05$ level).

Macro-nutrient	P ₂ O ₅	CaO	K ₂ O	MgO			
	%	%	%	%			
Park soil	0.323 a	0.416 a	0.610 a	0.173 a			
Bottom ash	0.440 b	0.456 a	1.198 b	0.188 a			
Heavy-metal	As ^z	Cd	Cu	Pb	Zn	Hg	
	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	
Park soil	0.597 b	0.077 a	12.11 a	1.273 a	36.89 b	ND	
Bottom ash	0.163 a	0.068 a	8.956 a	0.827 a	29.28 a	ND	

^z Total concentration (Microwave digestion method; RDA, 2000)

토양질 분석결과 현장 시험구를 설치한 후 3회 (2016년 6, 7, 10월)에 걸쳐 시험구 및 대조구 토양의 특성을 분석하였다 (Table 3). 시험기간 동안 동일 시험구 토양의 특성은 시간에 따른 변화는 없는 것으로 나타나 본 논문에서는

Table 3. Variation of physico-chemical and biological properties in the field microcosm testbed as affected by artificial soil manufactured with coal bottom ash (Different letter indicates significant differences at $p < 0.05$ level).

Chemical	pH	EC	Avail. P ₂ O ₅	Ex. ^z Ca	Ex. K	Ex. Mg
	1:5	dS m ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹
Park soil	6.36 a	0.24 a	69.0 a	69.3 a	8.87 a	13.3 a
Bottom ash	6.27 a	0.32 a	232 b	76.2 a	20.3 b	16.6 a
Physical	Water content	Pore interval	Pore area	Soil hardness		
	%	mm	mm ²	mm		
Park soil	19.4 a	0.70 a	0.32 a	21.3 b		
Bottom ash	22.6 b	1.54 b	7.22 b	13.0 a		
Biological	MP ^y	UA ^x	DHA ^w	APA ^v		
	CFU	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹		
Park soil	2.2*10 ⁶ a	65.3 a	79.6 a	385 a		
Bottom ash	4.8*10 ⁶ b	66.1 a	83.9 a	424 b		

^z Exchangeable concentration (1 N Ammonium acetate extraction; NIAST, 2000), ^y Microbial population, ^x Urease, ^w Dehydrogenase, ^v Acid-phosphatase

최종 모니터링 시점에서 채취한 토양 분석결과를 이용하여 기술하였다. 토양의 pH는 대조구와 실험구에서 각각 6.36과 6.27로 비슷한 수준을 보였고, EC는 0.24 dS m⁻¹와 0.36 dS m⁻¹로 식물생육 장애 농도 (2.0 dS m⁻¹)보다 낮은 수준으로 분석되었다 (Brady and Weil, 2010). 교환성 칼슘 및 마그네슘 함량은 통계적 유의성은 없었지만, 대조구보다 실험구에서 10% 이상 증가하였다. 또한, 토양 내 유효인산과 교환성 칼륨의 경우 대조구 (P₂O₅ 69.0 mg kg⁻¹, Ex. K 8.87 mg kg⁻¹)보다 실험구 (P₂O₅ 232 mg kg⁻¹, Ex. K 20.3 mg kg⁻¹)에서 통계적으로 유의하게 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 선행연구에서 보고된 바와 같이 석탄회의 토양 처리가 비효 증진에 도움을 줄 수 있다는 결과와 일치하는 것으로 판단된다 (Oh et al., 2013; Pandey et al., 2009; Thind et al., 2012). 토양 물리적 특성 지표로 분석한 수분함량, 공극의 간격과 면적 및 토양 경도는 대조구에 비해 실험구에서 개선된 효과를 보였다. 실험구의 공극 면적은 7.22 mm²로 대조구 (0.32 mm²)보다 증가하였고, 이러한 결과는 궁극적으로 토양의 경도를 40% (일반토양 21.3 mm → 인공토양 13.0 mm) 수준 감소시키는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 Sharma et al. (2012) 이 보고한 바와 같이 석탄회의 처리는 토양의 비중, 공극률, 수분 보유력, 토성 등의 물리적 특성 개선에 이점을 제공할 수 있다는 결과에 따른 것으로 판단되고, 식생기반재로 활용할 경우 통기성 및 근계 발달에 이점을 제공할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 식생기반재로 사용한 인공토양이 토양의 생물학적 특성에 미치는 영향은 미생물 개체수와 효소 활성도를 분석하여 평가하였다. 미생물 개체수의 경우 실험구에서 4.8*10⁶ CFU로 일반토양 (2.2*10⁶ CFU)을 사용한 대조구보다 2배 수준 유의하게 증가한 것으로 나타났고, 이는 바닥재의 다공성 특성에 기인하여 미생물이 정착하기에 적절한 공간을 제공한다고 보고한 Park et al. (2012)의 결과에 의한 것으로 판단된다. 이와 함께 UA, DHA 등 토양 효소 활성도는 대조구에 비해 실험구 토양에서 소폭 증가하였고, APA는 대조구보다 10% 수준 유의하게 증가하는 것으로 나타났다. 효소 활성도와 관련하여 많은 선행연구자들은 토양의 중금속 함량과 반비례하고 토양 특성의 개선도와 비례한다고 보고한 결과에 따른 것으로 인공토양 처리에 따라 토양의 물리·화학적 특성이 개선되며 생물학적 특성 지표값이 함께 증가한 것으로 판단된다 (Ahmad et al., 2012; Koo et al., 2012; Lee et al., 2011). 토양 내 중금속 함량의 경우 대조구 및 실험구에서 채취한 시료 모두 국내 토양환경보전법의 기준치를 만족하는 것으로 나타났으나, 실험구의 함량이 대조구

Table 4. Variation of heavy metal concentration in the field microcosm testbed as affected by artificial soil manufactured with coal bottom ash (Different letter indicates significant differences at $p < 0.05$ level).

After 6 month	As ^z mg kg ⁻¹	Cd mg kg ⁻¹	Cu mg kg ⁻¹	Pb mg kg ⁻¹	Zn mg kg ⁻¹	Hg mg kg ⁻¹
Criteria	25/75	4/12	150/450	200/600	300/900	4/12
Park soil	0.83 a	0.25 a	16.4 b	17.4 b	64.1 a	ND
Bottom ash	0.71 a	0.11 a	8.91 a	6.31 a	55.7 a	ND

^z Total concentration (Aqua regia extraction; ME, 2010)

보다 더 낮은 수준으로 분석되었다 (Table 4). 이는 본 연구에서 바닥재로 제조하여 사용한 인공토양을 식생기반재로 활용하는데 있어 더욱 가치 있는 결과로 판단된다.

Conclusions

본 연구는 석탄화력 발전소에서 석탄 연소 후 발생하는 바닥재를 이용하여 제조한 인공토양을 식생기반재로의 활용 가능성을 평가하고자 수행하였고, 현장 시험구를 설치 후 주기적으로 잔디의 생육 평가 및 토양 특성 분석을 통해 효율성을 평가하였다. 인공토양을 처리한 시험구에서 생육한 잔디의 뿌리와 줄기 생육은 일반토양 시험구보다 증가하였고, 이와 함께 단위면적 당 생산량도 유의하게 증가하는 것으로 나타났다. 채취한 잔디의 품질은 인공토양 시험구에서 생육한 시료가 함유하는 영양원소 함량이 상대적으로 높으며, 중금속 함량은 낮은 수준으로 품질이 개선된 것으로 나타났다. 이러한 결과는 인공토양 처리에 따라 토양의 물리적, 화학적, 생물학적 특성이 개선됨에 따라 나타난 것으로 시험 결과 토양의 비옥도 증진, 물리성 개선은 물론 미생물 개체수와 효소 활성도가 증가한 것에 기인한 결과로 판단된다. 또한 바닥재의 사용으로 문제 발생의 여지가 있는 중금속 함량은 일반토양 시험구보다 인공토양 시험구에서 상대적으로 낮은 수준을 보여 안전성에도 문제가 없는 것으로 나타났다. 본 연구에서 도출된 결과를 종합하여 볼 때 바닥재를 식생기반재로 활용할 때 토양 특성 개선 및 식물 생육에 대한 이점을 활용할 수 있는 가능성은 충분하다고 판단되며, 이를 실제 공원부지, 체육부지 등에 확대하여 사용하기 위해서는 식생기반재의 토양 내 처리 위치, 식생의 종류 등에 따른 적용 효율성에 대한 다양한 연구가 더 이루어져야 할 것으로 사료된다.

References

- Ahmad, M., Y. Hashimoto, D. H. Moon, S. S. Lee, and Y. S. Ok. 2012. Immobilization of lead in a Korean military shooting range soil using eggshell waste: An integrated mechanistic approach. *J. Hazard. Mater.* 209-210:392-401.
- Brady, N. C. and R. R. Weil. 2010. *Elements of the Natural and Properties of Soil* (3rd edi.). MacMillan, New York.
- Gupta, A. K., S. Dwivedi, S. Shina, R. D. Tripathi, U. N. Rai, and S. N. Singh. 2007. Metal accumulation and growth performance of *Phaseolus Vulgaris* grown in fly ash amended soil. *Bioresou. Technol.* 98:3404-3407.
- Karmakar, S., B. N. Mitra, and B.C. Ghosh. 2010. Enriched coal ash utilization for augmenting production of rice under lateritic soil. *Coal Combust. Gasif. Prod.* 2:45-50.
- Kim, J. H., Y. Lee, E. J. Kim, S. Gu, E. J. Shon, Y. S. Seo et al. 2014a. Exposure of iron nanoparticles to *Arabidopsis thaliana* enhances root elongation by triggering cell wall loosening. *Environ. Sci. Technol.* 48:3477-3485.

- Kim, Y. H. 2016. Manufacture of Lightweight Aggregates using Bottom Ash. Magazine of RCR. 11(2):30-34.
- Kim, Y. G., W. S. Lim, C. O. Hong, and P. J. Kim. 2014b. Effect of combined application of bottom ash and compost on heavy metal concentration and enzyme activities in upland soil. Korean J. Environ. Agric. 33(4):262-270.
- Koo, N., S. H. Lee, J. Jung, and J. G. Kim. 2012. Arsenic mobility in the amended mine tailings and its impact on soil enzyme activity. Environ. Geochem. Health. 34:337-348.
- Lee, S. H., H. Park, N. Koo, S. Hyun, and A. Hwang. 2011. Evaluation of the effectiveness of various amendments on trace metals stabilization by chemical and biological methods. J. Hazard. Mater. 188:44-51.
- Lee, Y. B., H. S. Ha, C. H. Lee, H. Lee, B. H. Ha, and P. J. Kim. 2005. Improving rice productivity and soil quality by coal ash-phosphogypsum mixture application. Korean J. Soil Sci. Fert. 38:45-51.
- Ma, X., A. Gurung, and Y. Deng. 2013. Phytotoxicity and uptake of nanoscale zero-valent iron (nZVI) by two plants species. Sci. Total Environ. 443:844-849.
- Ministry of Environment (ME). 2010. The Korean Standard Method of Environmental Pollutions for Soil Pollution. National Institute of Agricultural Science and Technology (NIAST). 2000. Methods of Soil Chemical Analysis.
- Oh, S. J., H. S. Yun, S. M. Oh, S. C. Kim, R. Y. Kim, Y. H. Seo, K. S. Lee, Y. S. Ok, and J. E. Yang. 2013. Effect of fly ash fertilizer on paddy soil quality and rice growth. J. Appl. Biol. Chem. 56(4):229-234.
- Oh, S. J. 2015. Screening and efficiency of amendments for metal stabilization in the contaminated arable land. PhD thesis. Kangwon National University.
- Pandey, V. C., P. C. Abhilash, R. N. Upadhyay, and D. D. Tewari. 2009. Application of fly ash on the growth performance and translocation of toxic heavy metals within *Cajanus cajan* L.: implication for safe utilization of fly ash agricultural production. J. Hazard. Mater. 166:255-259.
- Park, J. C., D. Y. Chung, and G. H. Han. 2012. Effects of bottom ash amendment on soil respiration and microbial biomass under anaerobic conditions. Korean J. Soil Sci. Fert. 45(2):260-265.
- Patra, K. C., T. R. Rautray, and P. Nayak. 2012. Analysis of grain grown on fly ash treated soils. Appl. Radiat. Isot. 70:1797-1802.
- Rural Development Administration (RDA). 2000. Analyses of soil and plant.
- Sajwan, K. S., A. K. Alva, and R. F. Keefer. 2003. Chemistry of Trace Elements in Fly Ash. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, USA. 346.
- Sharma, N. K., S. Mitra, V. Sehgal, and S. Mishra. 2012. An assessment of physical properties of coal combustion residues w.r. to their utilization aspects. Int. J. Environ. Protect. 2(2):31-38.
- Thind, H. S., Y. Singh, B. Singh, Y. Singh, S. Sharma, M. Vashistha et al. 2012. Land application of rice husk ash, bagasse ash and coal fly ash: effects on crop productivity and nutrient uptake in rice-wheat system on an alkaline loamy sand. Field Crop Res. 135:137-144.