

Research Article

Open Access

## 밭 토양에서 바닥재와 축분퇴비의 혼합시용이 토양의 중금속 함량 및 호소활성에 미치는 영향

김용균,<sup>1</sup> 임우섭,<sup>1</sup> 홍창오,<sup>1,2\*</sup> 김필주<sup>3,4\*\*</sup>

<sup>1</sup>부산대학교 생명환경화학과, <sup>2</sup>부산대학교 생명산업융합연구원, <sup>3</sup>경상대학교 농업생명과학원,  
<sup>4</sup>경상대학교 대학원(BK 21 Program) 응용생명화학과

### Effect of Combined Application of Bottom Ash and Compost on Heavy Metal Concentration and Enzyme Activities in Upland Soil

Yong Gyun Kim,<sup>1</sup> Woo Sup Lim,<sup>1</sup> Chang Oh Hong<sup>1,2\*</sup> and Pil Joo Kim<sup>3,4\*\*</sup> (<sup>1</sup>Department of Life Science and Environmental Biochemistry, Pusan National University, Miryang 627-706, Korea, <sup>2</sup>Life and Industry Convergence Research Institute, Pusan National University, Miryang 627-706, Korea, <sup>3</sup>Institute of Agriculture and Life Sciences, Jinju 660-701, Korea, <sup>4</sup>Division of Applied Life Science, Graduate School (Brain Korea 21 Program), Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea)

Received: 17 July 2014 / Revised: 4 August 2014 / Accepted: 27 October 2014

Copyright © 2014 The Korean Society of Environmental Agriculture

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

#### Abstract

**BACKGROUND:** Coal combustion bottom ash(BA) has high carbon and calcium content, and alkaline pH, which might improve nutrient cycling in soil related to microbial enzyme activities as it is used as soil amendment. However, it contains heavy metals such as copper(Cu), manganese (Mn), and zinc(Zn), which could cause heavy metals accumulation in soil. Compost might play a role that stabilize BA. The objective of this study was to evaluate effect of combined application of BA and compost as soil amendment on heavy metals concentration, enzyme activities, chemical properties, and crop yield in upland soil.

**METHODS AND RESULTS:** BA was applied at the rate of 0, 20, 40, and 80 Mg/ha under different rate of compost application (0 and 30 Mg/ha) in radish (*Raphanus sativus var*) field. Combined application of BA and compost more improved chemical properties such as pH, EC, OM, total nitrogen, available phosphate, and exchangeable cations of soil than single application of BA. Water soluble Mn and Zn concentration in soil significantly decreased with increasing application rate of BA. Decrease in those metals concentration was accelerated with combined application of BA and compost. Urease and dehydrogenase activities significantly increased with increasing application rate of BA. Phosphatase activities were not affected with single application of BA but increased with combined application of BA and compost. Radish yield was not affected by application rate of BA.

**CONCLUSION:** From the above results, combined application of BA and compost could be used as soil amendment to improve chemical properties and enzyme activities of soil without increase in heavy metal concentration and decrease in crop yield in upland soil.

\*교신저자(corresponding author): Chang Oh Hong  
Phone: +82-55-350-5548; Fax: +82-55-350-5549;  
E-mail: soilchem@pusan.ac.kr

\*\*공동교신저자(Co-corresponding author): Pil Joo Kim  
Phone: +82-55-772-1966; Fax: +82-55-772-1969;  
E-mail: pjkim@gnu.ac.kr

**Key words:** Bottom Ash, Compost, Enzyme activity, Heavy metal, Soil amendment

## 서론

우리나라에서 화력발전소의 부산물로 발생된 석탄회(煤灰)의 양은 2012년에 연간 약 870만 톤이었으며 향후 2020년에는 연간 1,660만 톤에 달할 것으로 예상하고 있다(Kim *et al.*, 2013). 석탄회가 환경에 미치는 부정적 영향에도 불구하고 석탄이 우리나라의 주요 에너지원이기 때문에 석탄회의 발생량은 계속 증가될 전망이다. 석탄회의 폐기처리는 심각한 문제가 되고 있다. 시멘트와 콘크리트의 제조에 석탄회가 일부 사용되고 있어 석탄회 폐기처리의 부담이 다소 줄기는 하였으나 현재 생산되는 석탄회의 재활용을 극대화시키기 위해 기존의 재활용용도 이외에 대량으로 활용할 수 있는 방안 마련이 시급한 실정이다.

바닥재를 농업적으로 재활용하는 것은 바닥재의 폐기문제를 해결할 뿐만 아니라 작물의 생산성 또한 증대시킬 수 있을 것이다. 일반적으로 바닥재의 pH는 9 이상으로(Cha *et al.*, 1999) 산성토양을 개량하여 농사에 적합하도록 할 수 있으며(Moliner and Street, 1982) 토양 내 Si, Na, K, Ca, Mg, B, S와 일부 미량원소의 유효도를 증대시킨다(Elsewi *et al.*, 1981; Druzina *et al.*, 1983; Wong and Wong, 1989; Ko, 2000). 그러나 바닥재는 As, B, Cd, Cu, Mn, Zn와 같이 다량으로 존재 시 식물과 토양 및 지하수에 악영향을 미칠 수 있는 원소들을 포함하고 있어 우리나라 이외 대부분의 나라에서도 일반적으로 비료로서 사용되지 못하고 있다(Adriano *et al.*, 1978; Page *et al.*, 1979; Adriana *et al.*, 1980).

현재까지 바닥재를 농업적으로 활용하기 위해 많은 연구들이 수행되어졌으나 대부분의 연구들이 바닥재의 사용에 따른 토양의 중금속 함량 및 미생물의 활성에 미치는 영향에 대한 조사가 부족하였다(Mittra *et al.*, 2005; Patra *et al.*, 2012). 일부 연구에서는 바닥재 내에 포함되어 있는 중금속의 식물이용성을 저감시키기 위하여 중금속을 흡착할 수 있는 하수슬러지와 혼합 사용하여 토양개량제로 활용하는 방안에 대해 조사하였다(Lai *et al.*, 1999). 그러나 하수슬러지와 같은 부산물들은 다량의 중금속을 함유하고 있어 토양의 건전성에 미치는 영향에 대해 의문시 되어왔다.

토양 내 축분퇴비의 사용은 토양의 pH와 음하전도를 증대시켜 양이온성 중금속을 부동화시켜 식물이용성을 감소시

킬 수 있다고 보고되고 있다(Pierzynski and Schwab, 1993; Krebs *et al.*, 1998; Merrington and Madden, 2000; Bolan *et al.*, 2003). 또한 축분퇴비는 C, N, P, K 등과 같은 식물과 미생물의 생육에 필요한 영양분을 포함하고 있어 토양에 시용 시 토양의 화학적 특성과 미생물 활성을 향상시킬 수 있는 것으로 보고되었다(Ros *et al.*, 2006; Nayak *et al.*, 2007; Nair and Ngouajio, 2012). 따라서 본 연구에서는 바닥재의 농업적 활용성을 증대시키기 위해 바닥재의 안정화 제재로서 축분퇴비를 선별하였고 바닥재와 축분퇴비의 혼합 사용이 토양에 미치는 영향을 조사하고자 하였다. 이를 위해 알타리무의 재배토양에서 바닥재와 축분퇴비의 혼합사용량에 따른 토양의 화학적 특성, 토양 내 중금속의 함량, 효소활성의 변화 및 알타리무의 수량을 조사하였다.

## 재료 및 방법

### 공시토양 및 재료 특성

**Table 2. Chemical properties of bottom ash and compost used for the study**

Item	Bottom ash	Compost
pH (soil:H <sub>2</sub> O, 1:5)	8.8	6.2
EC (ds m <sup>-1</sup> , soil:H <sub>2</sub> O 1:5)	5.5	4.1
Total content (g/kg)		
C	36.2	391
N	3.3	21.5
P	0.9	23.8
K	0.7	36.8
Ca	45.6	18.5
Mg	4.9	5.5
0.1M HCl extractable (mg/kg)		
As	1.19	2.7
Cd	0.28	0.25
Cu	8.0	4.2
Mn	20.1	6.2
Pb	1.53	8.57
Zn	6.2	15.8

본 연구를 수행하기 위해 경남 합천군 술곡리의 발토양(128°01'N 34°37'E)을 공시토양으로 선정하였다. 대상지역의 토양은 칠곡통에 속하는 토양이었으며 점토 6.1%, 미사 35%, 모래 58.9%를 포함하는 사질양토(Sandy loam)이었다. 공시

**Table 1. Chemical properties of the selected soil**

pH (H <sub>2</sub> O,1:5)	OM <sup>Z</sup> (g/kg)	T-N <sup>Y</sup> (g/kg)	Av-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> <sup>X</sup> (mg/kg)	CEC <sup>W</sup> (cmol <sub>c</sub> /kg)	Ex-cation <sup>V</sup> (cmol <sub>c</sub> /kg)			0.1 M HCl extractable heavy metals (mg/kg)		
					K	Ca	Mg	Cu	Mn	Zn
5.9	49.4	4.2	268	10.1	0.21	4.30	1.30	3.48	36	3.66

<sup>Z</sup>OM: organic matter; <sup>Y</sup>T-N: total nitrogen; <sup>X</sup>Av.P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; available phosphate; <sup>W</sup>CEC: cation exchange capacity; <sup>V</sup>Ex. Cation: exchangeable cation.

**Table 3. Analysis of variance (ANOVA) and probability values for chemical properties of soil, water soluble heavy metals concentration, enzyme activities, and radish yield at harvest**

Parameter	Source of variation		
	Compost rate(CR)	Bottom ash rate(BR)	CR×BR
df	1	3	3
pH	< 0.001	NS*	NS
EC	0.010	NS	NS
OM	0.030	NS	NS
T-N	0.009	NS	NS
Av.P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	< 0.001	0.006	0.002
Ex-cation			
K	< 0.001	NS	NS
Ca	< 0.001	0.010	NS
Mg	< 0.001	0.008	NS
Water soluble heavy metals			
Cu	0.010	NS	NS
Mn	< 0.001	0.008	0.043
Zn	< 0.001	0.003	0.014
Enzyme activities			
Urease	< 0.001	0.022	< 0.001
Dehydrogenase	< 0.001	NS	NS
Acidic phosphatase	< 0.001	NS	NS
Alkaline phosphatase	0.006	NS	NS
Yield	NS	NS	NS

\*NS : Not significant

토양의 pH는 5.9로 약산성이었으며 유기물의 함량은 49.4 g/kg이었다. 자세한 공시토양의 이화학적 특성은 Table 1에 나타냈다. 공시재료인 바닥재는 경남 하동에 위치한 화력발전소에서 발생하는 바닥재(Bottom ash)를 채취하였으며, 바닥재를 안정화하기 위한 안정화제재로는 시중에 판매되고 있는 축분퇴비를 선정하였다. 공시재료의 화학적 특성은 Table 2에 나타냈다.

#### 현장시험

밭 토양에서 바닥재와 축분퇴비의 혼합시용이 토양특성 및 작물수량에 미치는 영향을 조사하기 위하여 2005년 5월 초에 알타리무(*Raphanus sativus* var) 씨를 파종하여 60일간 재배를 실시하였다. 처리구 (각각 0.5×0.5 m)는 난피법에 따라 설치하였으며, 바닥재를 0, 20, 40, 80 Mg/kg으로 사용하고 축분 퇴비를 0과 30 Mg/kg 사용하여 3반복으로 실시하였다. 모든 처리구에 질소-인산-가리(N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O)를 기비로 90-78-70 kg/ha, 추비로 질소와 가리를 각각 90, 70 kg/ha를 동일한 양을 처리하였다.

#### 토양의 화학적 특성 및 중금속 함량 조사

공시토양 및 시험 후 토양의 이화학적 분석방법은 다음과 같은 방법으로 수행하였다: pH 및 전기전도도(Electrical conductivity, EC)는 토양:중류수의 비율을 1:5로 하여 교반 후 측정하였다. 유기물 함량(Wakley and Black method; Allison 1965), 총질소 함량(Kjeldahl method; Bremner,

1965), 치환성 양이온 K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>는 1 M NH<sub>4</sub>-acetate (pH 7.0)로 침출한 후 AAS(Atomic absorption spectroscopy, Perkin elmer model 3300, Norwalk, CT, USA)로 측정하였다. 유효인산의 함량은 Lancaster 방법 (RDA, 1988)를 이용하여 분석하였다. 토양의 양이온 치환용량을 측정하기 위하여 토양 5 g을 1 M NaCl 30 mL을 가하여 1 시간 동안 교반한 후 원심분리시켜 상등액을 따라내고 남아 있는 토양에 ethyl alcohol 20 mL을 가하여 남아있는 침출액을 3 회 반복하여 씻어냈다. Ethyl alcohol을 분리시킨 후 상등액은 따라내고 남은 토양에 1 M NH<sub>4</sub>OAC 30 mL을 가하여 1 시간 동안 침출하였다. 침출 후 여과시켜 여과액 내의 나트륨(Na)의 함량을 ICP-OES(inductively coupling plasma optical emission spectroscopy, Perkin elmer model DV 4300, Shelton, CT, USA)로 분석하여 양이온치환용량을 구하였다.

공시재료인 바닥재와 축분퇴비의 이화학적 분석방법은 다음과 같이 수행하였다: pH 및 전기전도도(EC)토양:중류수의 비율을 1:5로 하여 교반 후 측정하였다. 유기물 함량은 회화법(Nelson-sommers, 1996)으로 분석하였고, 혼합분해액(H<sub>2</sub>O:H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:HClO<sub>4</sub>, 1:5:9)을 이용하여 바닥재와 축분퇴비를 분해한 후 총 인산 함량은 몰리브덴 청법(Murphy and Riley, 1962)으로, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>의 총합량은 AAS로 측정하였다. 중금속 분석은 0.1 M HCl을 이용하여 침출 후 ICP-OES로 분석하였다.

수확 후 토양 내 수용성 중금속(Cu, Mn, Zn)의 함량은

**Table 4. Chemical properties of soils amended with different rates of bottom ash and compost at harvest**

Bottom Ash (Mg/ha)	pH		EC <sup>Z</sup> (dS/m)		OM <sup>Y</sup> (g/kg)		T-N <sup>X</sup> (g/kg)		Av-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> <sup>W</sup> (mg/kg)		Ex-cation <sup>V</sup> (cmol+/kg)								
															K	Ca		Mg	
	Compost (Mg/ha)																		
	0	30	0	30	0	30	0	30	0	30	0	30	0	30	0	30			
0	6.03 <sup>bc</sup>	6.23 <sup>a</sup>	1.63 <sup>a</sup>	1.05 <sup>a</sup>	49.9 <sup>a</sup>	49.2 <sup>a</sup>	2.5 <sup>c</sup>	2.9 <sup>a</sup>	153 <sup>a</sup>	202 <sup>a</sup>	0.91 <sup>ab</sup>	1.07 <sup>a</sup>	0.26 <sup>ab</sup>	0.35 <sup>a</sup>	1.41 <sup>ab</sup>	1.50 <sup>b</sup>			
20	5.97 <sup>c</sup>	6.27 <sup>a</sup>	1.65 <sup>a</sup>	0.82 <sup>a</sup>	45.1 <sup>c</sup>	51.3 <sup>a</sup>	2.6 <sup>bc</sup>	2.9 <sup>a</sup>	151 <sup>a</sup>	182 <sup>b</sup>	0.97 <sup>a</sup>	1.08 <sup>a</sup>	0.23 <sup>b</sup>	0.35 <sup>a</sup>	1.41 <sup>ab</sup>	1.64 <sup>ab</sup>			
40	6.16 <sup>ab</sup>	6.22 <sup>a</sup>	0.89 <sup>a</sup>	0.78 <sup>a</sup>	48.4 <sup>ab</sup>	49.6 <sup>a</sup>	2.7 <sup>ab</sup>	2.8 <sup>a</sup>	159 <sup>a</sup>	182 <sup>b</sup>	0.83 <sup>ab</sup>	1.05 <sup>a</sup>	0.27 <sup>ab</sup>	0.37 <sup>a</sup>	1.39 <sup>b</sup>	1.62 <sup>ab</sup>			
80	6.22 <sup>a</sup>	6.26 <sup>a</sup>	1.01 <sup>a</sup>	0.80 <sup>a</sup>	47.3 <sup>b</sup>	48.4 <sup>a</sup>	2.9 <sup>a</sup>	2.9 <sup>a</sup>	153 <sup>a</sup>	182 <sup>b</sup>	0.79 <sup>b</sup>	1.02 <sup>a</sup>	0.30 <sup>a</sup>	0.38 <sup>a</sup>	1.52 <sup>a</sup>	1.78 <sup>a</sup>			
Rate mean <sup>U</sup>	6.10 <sup>B</sup>	6.24 <sup>A</sup>	1.30 <sup>A</sup>	0.86 <sup>B</sup>	47.7 <sup>B</sup>	49.6 <sup>A</sup>	2.7 <sup>B</sup>	2.9 <sup>A</sup>	154 <sup>B</sup>	187 <sup>A</sup>	0.88 <sup>B</sup>	1.05 <sup>A</sup>	0.26 <sup>B</sup>	0.36 <sup>A</sup>	1.41 <sup>B</sup>	1.63 <sup>A</sup>			

<sup>Z</sup>EC:Electrical conductivity; <sup>Y</sup>OM: organic matter; <sup>X</sup>T-N; total nitrogen; <sup>W</sup>Av-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: available phosphate; <sup>V</sup>Ex. Cation: exchangeable cation; <sup>U</sup>Rate mean: mean value across application rate. Upper and lower case letters are for column and row comparison. Values with same letter within a column or row are not significantly different a  $P=0.05$

증류수를 이용하여 토양과의 비율을 1:10 질량비로 1 시간 교반한 후 Whatman No.42 (pore size 2.5  $\mu$ m) 여과지로 여과한 후 각 중금속의 농도를 ICP-OES로 측정하였다.

F-test 결과값이  $P < 0.05$ 의 범위에서 유의한 경우에만 최소 유의차 검정(LSD)을 실시하였다.

## 결과 및 고찰

### 토양 내 효소활성 조사

토양의 urease, dehydrogenase, acidic 및 alkaline phosphatase 활성은 다음과 같이 수행하였다. Urease활성은 토양 1 g 과 기질로 urea 1 ml, trihydroxymethylaminomethane(THAM, pH 9) 완충액 9 ml를 넣은 다음 37°C에서 2 시간 반응시킨 후 KCl-AgSO<sub>4</sub> 용액 35 ml를 가하여 여과한 후 0.3 M NaOH와 Sodium salicylate solution 그리고 Dichloroisocyanurate 용액을 첨가하여 발색시킨 후 690 nm에서 흡광도를 측정하였다(Sardans and Penuelas, 2005). Dehydrogenase의 활성은 토양 1 g과 기질로서 2-(p-iodophenyl)-3-(p-nitrophenyl)-5-phenyltetrazolium chloride(INT) 1 ml와 증류수 1 ml를 혼합하여, 40°C에서 24시간 반응시킨 후 여과하여 Iodonitrotetrazolium formazan(INTF)을 N,N-dimethylformamide로 발색시켜 464 nm에서의 흡광도를 측정하였다(Mersi and Schinner, 1991).

Acidic 및 alkaline phosphatase의 활성은 disodium p-nitrophenyl phosphate를 기질로 하여 토양 1 g에 기질 1 ml를 넣고 완충액(pH 6.5, pH 11) 4 ml를 넣은 다음 37°C로 1시간 반응시킨 후 0.5 M CaCl<sub>2</sub> 1 ml와 0.5 M NaOH 4 ml를 넣고 여과 후 400 nm에서 흡광도를 측정하였다(Eivazi and Tabatabai, 1977).

### 수량조사

수확한 알타리무를 70°C에서 72시간을 건조시킨 후 건물 중량을 측정하였다. 바닥재의 처리량과 건물중량의 관계를 모델링하였다.

### 통계분석

통계분석은 SAS 통계프로그램(버전 9.2)을 이용하여 실시하였다(SAS institute, 2006). 처리간의 차이를 비교하기 위하여 조사된 자료는 ANOVA 검증을 통하여 분석하였다.

### 토양 내 화학적 특성

본 연구에서 바닥재의 사용량은 알타리무 수확 후 토양의 pH에 영향을 미치지 않았다(Table 3). 퇴비가 사용되지 않은 처리구에서 바닥재의 사용량을 80 Mg/ha로 처리하였을 때 무처리구에 비해 토양의 pH가 유의하게 증가되었으나 퇴비가 30 Mg/ha로 처리되어진 처리구에서 바닥재의 사용량을 증가시키기에 따른 토양 pH의 유의한 증가는 없었다(Table 4). 바닥재는 칼슘산화물(CaO)이나 마그네슘산화물(MgO)과 같은 금속산화물을 포함하고 있어 토양에 사용 시에 토양의 pH를 증대시킬 수 있다고 보고되었다(Adriano *et al.*, 1980). 축분퇴비의 사용은 알타리무 수확 후 토양의 pH에 유의하게 영향을 미쳤다(Table 3). 부식물질은 표면에 음하전을 띠고 있는 작용기를 많이 가지고 있어 토양용액 내 수소이온을 흡착시켜 토양의 pH를 증대시킬 수 있다(Bolan *et al.*, 2003). 바닥재 단독으로 사용하였을 때의 평균 토양의 pH는 6.10 이었으며 바닥재와 축분퇴비를 혼용하여 처리하였을 때 평균 토양의 pH는 6.24로 유의하게 증가하였다(Table 4).

축분퇴비의 사용은 수확 후 토양의 전기전도도(EC)에 유의한 영향을 미쳤으나 바닥재의 사용량은 유의한 영향을 미치지 않았다(Table 3). 축분퇴비를 0 과 30 Mg/ha로 처리한 모든 처리구에서 바닥재의 사용량을 증가시키기에 따라 토양의 EC의 평균값은 감소하는 경향을 나타내었으나 통계적으로 유의한 차이는 없었다(Table 4). 그러나 바닥재 단독으로 사용하였을 때의 평균 토양의 EC는 1.30 dS/m이었으며 바닥재와 축분퇴비를 혼용하여 처리하였을 때 평균 토양의 EC는 0.86 dS/m로 유의하게 감소하였다. 이러한 감소는 축분퇴비의 사용에 따른 희석에 의한 효과와 음하전을 많이 가지고 있는 부식물질이 토양 용액 내 양이온성 금속이온을 흡착하여 제거하였기 때문인 것으로 판단된다.

축분퇴비의 사용은 수확 후 토양의 유기물 함량에 유의한

**Table 5. Changes of water soluble heavy metals concentration in soils amended with different rates of bottom ash and compost at harvest**

Bottom Ash (Mg/ha)	water soluble heavy metal (mg/kg)					
	Cu		Mn		Zn	
	Compost (Mg/ha)					
	0	30	0	30	0	30
0	ND*	0.011 <sup>a</sup>	0.70 <sup>ab</sup>	0.24 <sup>a</sup>	1.08 <sup>a</sup>	0.39 <sup>a</sup>
20	ND	0.013 <sup>a</sup>	0.83 <sup>a</sup>	0.20 <sup>a</sup>	1.27 <sup>a</sup>	0.33 <sup>a</sup>
40	ND	0.007 <sup>a</sup>	0.27 <sup>c</sup>	0.15 <sup>a</sup>	0.52 <sup>b</sup>	0.29 <sup>a</sup>
80	ND	0.004 <sup>a</sup>	0.34 <sup>bc</sup>	0.17 <sup>a</sup>	0.47 <sup>b</sup>	0.26 <sup>a</sup>
Rate mean <sup>Z</sup>		0.01 <sup>A</sup>	0.54 <sup>A</sup>	0.19 <sup>B</sup>	0.84 <sup>A</sup>	0.32 <sup>B</sup>

-ND\* : not detect; <sup>Z</sup>Rate mean: mean value across application rate. Upper and lower case letters are for column and row comparison. Values with same letter within a column or row are not significantly different a  $P=0.05$

영향을 미쳤으나 바닥재 사용량은 유의하게 영향을 미치지 못하였다(Table 3). 축분퇴비를 사용하지 않은 처리구에서는 바닥재의 사용량을 증가시키기에 따라 토양 내 유기물의 함량이 다소 감소되어지는 경향을 나타내었으나 축분퇴비와 바닥재를 혼합 사용한 처리구에서는 바닥재사용량 증가에 따른 토양 내 유기물 함량의 유의한 변화는 없었다(Table 4). 그러나 바닥재 단독으로 사용하였을 때의 평균 토양의 유기물 함량은 47.7 g/kg이었으며 바닥재와 축분퇴비를 혼용하여 처리하였을 때 평균 토양의 유기물 함량은 49.6 g/kg로 유의하게 증가하였다. 이러한 증가는 축분퇴비가 함유하고 있는 높은 탄소의 함량에 의한 것으로 판단되어진다(Table 2).

축분퇴비의 사용은 수확 후 토양 내 총 질소의 함량에 유의한 영향을 미쳤으나 바닥재의 사용량은 유의하게 영향을 미치지 않았다(Table 3). 축분퇴비를 사용하지 않은 처리구에서는 바닥재의 사용량을 증가시키기에 따라 토양 내 총 질소의 함량이 유의적으로 증가하였다(Table 4). 이러한 증가는 바닥재에 포함되어 있는 질소의 함량에 의해 기인된 것으로 판단되어진다(Table 2). Adriano *et al.* (1980)은 바닥재는 식물에 필요한 다양한 원소들은 포함하고 있지만 질소는 포함하고 있지 않다고 보고하였으나 본 연구에 사용되어진 바닥재에서는 질소를 3.3 g/kg 포함하고 있는 것으로 조사되었다. 또한 Kim *et al.* (1997)은 바닥재의 사용을 통해 토양 내 질소의 함량을 증대시킬 수 있으며 배추의 수량도 증대시킬 수 있다고 보고하였다. 바닥재와 축분퇴비의 혼합사용 처리구에서는 바닥재의 처리량 증가에 따른 토양 내 총 질소의 함량 증가는 없었다(Table 4). 그러나 바닥재를 단독으로 사용하였을 때의 평균 토양의 총 질소 함량은 2.7 g/kg이었으며 바닥재와 축분퇴비를 혼용하여 처리하였을 때 평균 토양의 총 질소 함량은 2.9 g/kg로 유의하게 증가하였다. 이러한 증가는 축분퇴비가 함유하고 있는 질소의 함량에 의한 것으로 판단되어진다(Table 2). 축분퇴비의 사용과 바닥재의 사용량은 수확 후 토양 내 유효인산의 함량에 유의하게 영향을 미쳤다(Table 3). 축분퇴비를 사용하지 않은 처리구에서는 바닥재의 사용량을 증가시키기에 따라 토양 내 유효인산의 유의한 변화는 없었다(Table 4). 이러한 결과는 바닥재가 상대적으로 소

량의 인산인 0.9 g/kg만을 함유하고 있기 때문인 것으로 판단된다(Table 2). 축분퇴비와 바닥재를 혼합 사용한 처리구에서는 바닥재의 사용량을 증가시키기에 따라 토양 내 유효인산의 함량이 유의적으로 감소되어졌다. 이러한 감소는 다량의 바닥재가 토양에 사용됨에 따른 희석효과에 의한 것으로 판단되어진다. 바닥재를 단독으로 사용하였을 때의 평균 토양의 유효인산 함량은 154 mg/kg이었으며 바닥재와 축분퇴비를 혼용하여 처리하였을 때 평균 토양의 유효인산 함량은 187 mg/kg로 유의하게 증가하였다. 이러한 증가는 축분퇴비가 함유하고 있는 인산의 함량에 의한 것으로 판단되어진다(Table 2).

축분퇴비의 사용은 수확 후 토양 내 치환성 칼륨, 칼슘 및 마그네슘의 함량에 유의하게 영향을 미쳤으며 바닥재의 사용량은 치환성 칼슘과 마그네슘의 함량에 유의하게 영향을 미쳤다(Table 3). 축분퇴비가 사용되지 않은 처리구에서 바닥재의 사용량을 증가시키기에 따라 치환성 칼륨의 함량은 감소되는 경향을 나타내었으나 치환성 칼슘과 마그네슘의 함량은 증가하였다(Table 4). 시험에 사용된 바닥재는 칼슘과 마그네슘에 비해 상대적으로 적은 양의 칼륨을 포함하고 있어 바닥재 사용량 증가에 따른 희석 효과에 의해 치환성 칼륨의 함량이 감소되어진 것으로 판단되어진다(Table 2). 축분퇴비와 바닥재가 혼합사용된 처리구에서는 바닥재의 사용량을 증가시키기에 따라 치환성 칼륨과 칼슘의 양은 유의한 변화가 없었으나 치환성 마그네슘의 함량은 유의적으로 증가하였다(Table 4). 바닥재를 단독으로 사용하였을 때 보다 바닥재와 축분퇴비를 혼용하여 처리하였을 때 모든 치환성 양이온의 평균 함량은 유의하게 증가하였다. 이러한 결과는 시험에 사용된 축분퇴비 내 높은 칼륨, 칼슘, 마그네슘의 함량에서 기인된 것으로 판단된다(Table 2).

본 연구에서 바닥재를 단독으로 사용하였을 때 사용량 증가에 따라 토양의 pH, 총질소 함량, 치환성 칼슘과 마그네슘 함량이 증대되어 지는 결과를 보였다. 바닥재와 축분퇴비를 혼합사용하였을 때가 바닥재를 단독으로 사용하였을 때 보다 토양의 화학적 특성이 더욱 개선되어지는 것으로 판단된다. 바닥재와 축분퇴비의 혼합사용하였을 때 토양의 양분 함량에

Table 6. Enzyme activities of soils amended with different rates of bottom ash and compost at harvest

Bottom Ash (Mg/ha)	Enzyme activities							
	Urease ( $\mu\text{mol NH}_3/\text{g/h}$ )		Dehydrogenase (mg/kg/h)		Acidic phosphatase (mol/g/h)		Alkaline phosphatase (mol/g/h)	
	Compost (Mg/ha)							
	0	30	0	30	0	30	0	30
0	0.19 <sup>b</sup>	1.00 <sup>a</sup>	0.29 <sup>ab</sup>	1.60 <sup>a</sup>	1.97 <sup>a</sup>	2.31 <sup>a</sup>	0.87 <sup>a</sup>	1.12 <sup>ab</sup>
20	0.30 <sup>b</sup>	0.60 <sup>b</sup>	0.26 <sup>b</sup>	1.42 <sup>a</sup>	1.93 <sup>a</sup>	2.29 <sup>a</sup>	1.01 <sup>a</sup>	1.02 <sup>b</sup>
40	0.35 <sup>ab</sup>	0.53 <sup>b</sup>	0.30 <sup>ab</sup>	1.41 <sup>a</sup>	1.85 <sup>a</sup>	2.73 <sup>a</sup>	0.92 <sup>a</sup>	1.25 <sup>a</sup>
80	0.54 <sup>a</sup>	0.65 <sup>b</sup>	0.36 <sup>a</sup>	1.17 <sup>a</sup>	1.94 <sup>a</sup>	2.32 <sup>a</sup>	0.93 <sup>a</sup>	1.12 <sup>ab</sup>
Rate mean <sup>z</sup>	0.34 <sup>B</sup>	0.69 <sup>A</sup>	0.30 <sup>B</sup>	1.40 <sup>A</sup>	1.92 <sup>B</sup>	2.41 <sup>A</sup>	0.93 <sup>B</sup>	1.13 <sup>A</sup>

<sup>z</sup>Rate mean: mean value across application rate. Upper and lower case letters are for column and row comparison. Values with same letter within a column or row are not significantly different a  $P=0.05$

대한 부정적 영향은 없는 것으로 판단된다. 따라서 바닥재를 농경지에 사용하기 위해서는 축분퇴비와 혼합하여 사용하는 것이 좋은 방법이 될 수 있다. 그러나 혼합처리구에서 토양 화학적 특성을 개선시키는 효과는 바닥재의 사용에 따른 것 보다는 주로 축분퇴비의 투입에 의한 것으로 판단된다. 따라서 토양 내 양분 함량을 증진시키기 위한 바닥재와 축분퇴비의 혼합비율의 산정에 대한 더욱 많은 연구가 필요할 것으로 판단된다.

#### 토양 내 중금속 함량

토양 내 수용성의 형태로 존재하는 중금속들은 식물에 의해 쉽게 흡수되어 질 수 있으며(Adriano, 2001) 용탈수나 유거수를 통해 토양의 주변 환경으로 쉽게 유입될 수 있다(Wadman et al., 1987). 본 연구에 사용되어진 바닥재는 여러 종류의 중금속을 포함하고 있으나 그 중 구리, 망간 및 아연의 함량이 다른 중금속의 함량 보다 상대적으로 높아 바닥재와 축분퇴비의 사용에 따른 알타리무 수확 후 토양 내 수용성 구리, 망간 및 아연의 함량을 조사하였다.

축분퇴비의 사용은 수확 후 토양 내 수용성 구리, 망간 및 아연의 함량에 유의하게 영향을 미쳤으며 바닥재의 사용량은 수용성 망간과 아연의 함량에 유의하게 영향을 미쳤다(Table 3). 축분퇴비를 사용하지 않은 처리구에서는 바닥재의 사용량과 상관없이 모든 처리구에서 수용성 구리가 검출되지 않았다(Table 5). 무처리의 토양에서 수용성 구리의 함량은 검출되지 않았으며 바닥재의 처리에 따른 토양 내 수용성 구리 함량의 증대는 없었던 것으로 판단되어진다. 그러나 축분퇴비와 바닥재를 혼합사용한 모든 처리구에서는 수용성 구리의 함량이 검출되었으며 바닥재의 사용량 증가에 따른 수용성 구리의 함량의 유의한 변화는 없었다. 토양의 pH가 증가하게 되면 구리와 유기산의 착물형성에 의해 구리의 용해도가 증가하게 된다(Lai et al., 1999). 수확 후 토양의 pH는 축분퇴비와 바닥재를 혼합사용한 처리구에서 바닥재를 단독으로 사용한 처리구 보다 높게 나타났다(Table 4). 또한 축분퇴비의 사용에 따른 수확 후 토양 내 수용성 구리의 함량증가는 시험에 사용된 축분퇴비에 포함되어진 구리의 함량에 기인된 것으로

판단된다(Table 2). 축분퇴비를 사용하지 않고 바닥재를 단독으로 사용한 처리구에서는 바닥재의 사용량을 증가시킴에 따라 수용성 망간과 아연의 함량이 유의적으로 감소하였다(Table 5). 일반적으로 토양의 pH가 증가하게 되면 양이온성의 망간과 아연 같은 중금속의 용해도는 감소하게 된다(Lai et al., 1998; Lo et al., 2009). 축분퇴비를 사용하지 않고 바닥재를 단독으로 사용한 처리구에서 바닥재의 사용량을 증가시킴에 따라 수확 후 토양의 pH는 유의하게 증가하였다(Table 4). 바닥재의 사용량 증가에 따른 토양 내 수용성 망간과 아연의 함량감소의 다른 원인 중 하나는 바닥재의 사용에 따른 희석효과에 의한 것으로 판단되어진다. 축분퇴비와 바닥재가 혼합 사용되어진 처리구에서 바닥재의 사용량 증가에 따른 수용성 망간과 아연의 함량의 유의한 감소는 없었다(Table 5). 그러나 바닥재를 단독으로 사용하였을 때 보다 바닥재와 축분퇴비를 혼용하여 처리하였을 때 수용성 망간과 아연의 평균 함량은 유의하게 감소하였다. 부식물질은 표면에 음하전을 띠고 있는 작용기를 많이 가지고 있어 산성인 조건의 토양용액 내 수소이온을 흡착시켜 토양의 pH를 증대시킬 수 있어 중금속의 용해도를 감소시킬 수 있고 양이온성의 망간과 아연 같은 중금속을 흡착시킬 수 있다(Bolan et al., 2003). Table 4에서와 같이 바닥재 단독으로 사용하였을 때의 평균 토양의 pH는 6.10 이었으며 바닥재와 축분퇴비를 혼용하여 처리하였을 때 평균 토양의 pH는 6.24로 유의하게 증가하였다(Table 4).

본 연구에서 바닥재의 단독 처리구에서 바닥재의 사용량을 증가시킴에 따라 토양 내 수용성 망간, 아연의 함량이 유의적으로 감소하는 결과를 보였다. 비록 바닥재와 축분퇴비가 혼합된 처리구에서 바닥재 사용량 증가에 따라 토양 내 수용성 구리의 함량이 증가되는 경향을 나타내었으나 수용성 망간과 아연의 함량이 바닥재를 단독으로 처리하였을 때 보다 더욱 감소되어지는 결과를 나타내었다. 따라서 축분퇴비는 다량으로 존재 시 작물의 생육에 유해할 수 있는 토양 내 망간과 아연을 함량을 감소시키는 바닥재의 효과를 더욱 증대시키는 것으로 판단된다.

## 효소활성

축분퇴비의 사용은 수확 후 토양 내 urease, dehydrogenase, acidic phosphatase 및 alkaline phosphatase의 활성에 유의하게 영향을 미쳤으며 바닥재의 사용량은 urease의 활성에만 유의하게 영향을 미쳤다(Table 3). Urease는 토양 내 질소의 분해과정에 관여하는 효소로써 urease의 활성은 토양 내 질소의 순환의 정도를 나타내는 척도가 될 수 있다(Park and Hausinger, 1995). 축분퇴비를 사용하지 않은 처리구에서 바닥재의 사용량을 증가시키에 따라 urease의 활성은 유의하게 증가하였으나 바닥재와 축분퇴비를 혼합사용한 처리구에서 바닥재의 사용량을 증가시키에 따라 urease의 활성은 유의하게 감소되었다(Table 6). 그러나 바닥재를 단독으로 사용하였을 때의 평균 토양의 ureas 활성은  $0.34 \mu\text{mol NH}_3/\text{g/h}$ 이었으며 바닥재와 축분퇴비를 혼용하여 처리하였을 때 평균 토양의 urease 활성은  $0.69 \mu\text{mol NH}_3/\text{g/h}$ 로 약 두 배 이상 증가하였다. 바닥재 사용량 증가와 축분퇴비의 사용에 따른 urease 활성의 증가는 토양 내 질소함량의 증가와 관련이 있는 것으로 판단되어진다. 토양 내 urease 활성은 기질이 되는 질소의 농도에 상당히 의존적이며 기질의 농도가 증가하게 되면 urease의 활성은 증가하게 된다(Huang and Chen, 1992). 바닥재를 단독으로 사용하였을 때 바닥재의 사용량을 증가시키에 따라 수확 후 토양 내 총 질소의 함량은 유의적으로 증가하였으며 바닥재와 축분퇴비를 혼합사용하였을 때의 평균 총 질소의 함량이 바닥재를 단독으로 사용하였을 때의 평균 총 질소의 함량 보다 높게 나타났다(Table 4).

Dehydrogenase는 산화된 유기기질을 제거하는 전자수송체계에 관여하는 효소로 알려져 있다(Nybroe *et al.*, 1992). 축분퇴비의 사용은 수확 후 토양 내 dehydrogenase의 활성에 유의적으로 영향을 미쳤으나 바닥재의 사용량은 dehydrogenase의 활성에 유의적으로 영향을 미치지 않았다(Table 3). 바닥재를 단독으로 사용하였을 때 바닥재의 사용량을 증가시키에 따라 토양 내 dehydrogenase의 활성은 증가하는 경향을 나타내었다(Table 6). 바닥재의 사용량 증가에 따른 토양의 pH증가는 dehydrogenase 활성의 증가를 야기할 수 있다(Błńska, 2010; Moeskops *et al.*, 2010). 바닥재와 축분퇴비를 혼합 사용한 처리구에서 바닥재 사용량의 증가에 따른 dehydrogenase 활성의 유의한 변화는 없었다. 그러나 바닥재를 단독으로 사용하였을 때의 평균 토양의 dehydrogenase의 활성은  $0.30 \text{ mg/kg/h}$ 이었으며 바닥재와 축분퇴비를 혼용하여 처리하였을 때 평균 토양의 dehydrogenase의 활성은  $1.40 \text{ mg/kg/h}$ 로 약 네 배 이상 증가하였다. 축분퇴비의 사용에 따른 dehydrogenase 활성의 증가는 축분퇴비 내에 다량으로 포함되어 있는 쉽게 산화되기 쉬운 유기기질 때문인 것으로 판단되어진다. 다른 연구에서도 부산물 슬러지를 사용한 토양에서 dehydrogenase의 활성이 증가되어진다고 보고하였다(Garcia *et al.*, 1992).

Phosphatase는 핵산(nucleic acid)와 같은 기질로부터 인산을 절단해 내는 효소로써 phosphatase의 활성은 토양 내 인산의 순환 정도를 나타내는 척도가 될 수 있다(Wang

*et al.*, 1990). 축분퇴비의 사용은 acidic phosphatase와 alkaline phosphatase의 활성에 유의하게 영향을 미쳤으나 바닥재의 사용량은 두 효소 모두에 유의하게 영향을 미치지 않았다(Table 3). 바닥재의 사용량을 증가시키에 따라 acidic phosphatase와 alkaline phosphatase의 활성은 모두 유의하게 감소되거나 증가하지 않았다(Table 6). 그러나 바닥재를 단독 사용하였을 때 보다 바닥재와 축분퇴비를 혼합사용하였을 때 acidic phosphatase와 alkaline phosphatase의 활성 모두 유의하게 증가하였다. 축분퇴비에 의한 phosphatase 활성의 증가는 축분퇴비의 사용에 따른 유기물, 질소, 유효인산, 치환성 양이온과 같은 미생물의 영양분의 증가에 의한 것으로 판단되어진다(Table 4). Wang *et al.* (1990)은 토양에 부산물 슬러지를 사용하게 되면 높은 영양분의 함량에 의해 phosphatase의 활성이 증가되어진다고 보고하였다.

본 연구에서 바닥재를 단독으로 사용하여 사용량을 증가시키에 따라 urease의 활성이 증가되었으며 dehydrogenase와 acidic 및 alkaline phosphatase의 활성에 부정적 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 바닥재를 단독으로 사용하였을 때 보다 바닥재와 축분퇴비를 혼합하여 사용하였을 때 모든 효소의 활성을 더욱 증대시키는 것으로 조사 되었다. 따라서 바닥재를 축분퇴비와 혼합하여 사용하면 토양 내 효소활성에 대한 부정적 영향 없이 사용이 가능할 것으로 판단된다.

## 알타리무 수량

축분퇴비의 사용과 바닥재의 사용량은 알타리무의 수량을 유의하게 증대시키지 않았다(Table 3 and Fig. 1). 수량 반응식을 이용하여 알타리무의 수량은 바닥재 사용량(BA)과 다 음과 같은 관계가 있었다.

$$\begin{aligned} \text{축분퇴비 } 0 \text{ Mg/ha 사용의 알타리무 수량} &= \\ &62.9 + 0.482 \text{ BA} - 0.004 \text{ BA}^2 \text{ (model } R^2 = 0.879^{***}) \\ \text{축분퇴비 } 30 \text{ Mg/ha 사용의 알타리무 수량} &= \\ &77.8 + 0.420 \text{ BA} - 0.005 \text{ BA}^2 \text{ (model } R^2 = 0.495^*) \end{aligned}$$

축분퇴비 0과 30 Mg/ha로 사용한 경우 모두 바닥재 사용량 증가에 따른 알타리무 수량의 유의한 감소는 발견되지 않았다. 통계적으로 유의한 차이는 없었지만 바닥재를 단독 사용하였을 때 보다 바닥재와 축분퇴비를 혼합사용하였을 때 알타리무의 수량이 다소 증대된 결과를 나타내었다. 수량반응식을 이용하여 알타리무의 최고수량을 산정하여 본 결과, 바닥재와 축분퇴비를 혼합사용하였을 때 바닥재  $44.8 \text{ Mg ha}^{-1}$  사용 시  $87.0 \text{ Mg ha}^{-1}$ 이었다. 바닥재와 축분퇴비의 혼합사용에 따른 수량증대의 원인은 토양의 화학적 특성의 개선 및 양분함량의 증대, 토양 내 수용성 중금속의 함량 감소, 효소활성의 증대에 기인된 것으로 판단된다(Table 4, 5, and 6).

이상의 결과를 통해 볼 때, 바닥재와 축분퇴비를 혼합하여 사용하였을 때 알타리무의 수량에 어떠한 악영향을 미치지 않는 것으로 판단되며 바닥재를 단독으로 사용하였을 때 보다 바닥재와 축분퇴비를 혼합사용 하였을 때 통계적으로 유

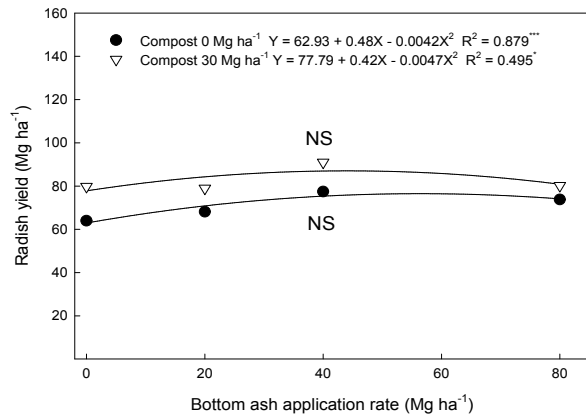


Fig. 1. Yield response to different rate of bottom ash and compost application.

의한 차이는 없었으나 다소의 수량증수를 보였다. 또한 바닥재를 단독으로 사용하였을 때 보다 바닥재와 축분퇴비를 혼합사용하였을 때 토양 내 중금속의 함량을 감소시키면서 화학적 특성 및 효소활성을 더욱개선시킨 것으로 판단된다. 따라서 바닥재를 농경지에 사용하기 위해서는 축분퇴비를 혼합 사용하는 것이 하나의 방법이 될 수 있을 것으로 판단된다.

## 요약

본 연구는 바닥재의 농업적 활용성을 증대시키기 위해 바닥재의 안정화 제제로써 축분퇴비를 선발하였고 알타리무의 재배토양에서 바닥재와 축분퇴비의 혼합 사용량에 따른 토양의 화학적 특성, 토양 내 중금속의 함량, 효소활성의 변화 및 알타리무의 수량을 조사하기 위해 실시되었다. 바닥재를 단독으로 사용하였을 때 보다 바닥재와 축분퇴비를 혼합 사용하였을 때 토양의 화학적 특성이 더욱 우수하게 개량되어지는 결과를 나타내었다. 바닥재의 사용량을 증가시킴에 따라 토양 내 수용성 망간과 아연의 함량이 유의적으로 감소하였으며 이러한 효과는 바닥재와 축분퇴비를 혼합 사용하였을 때 더욱 증가하는 것으로 나타났다. 바닥재의 사용량 증가는 알타리무 수확 후 토양 내 urease의 활성을 유의적으로 증가시켰다. 바닥재의 단독사용에 비해 바닥재와 축분퇴비의 혼합사용은 urease, dehydrogenase, acidic phosphatase 및 alkaline phosphatase의 활성을 더욱 증가시키는 것으로 나타났다. 바닥재와 축분퇴비의 혼합사용은 알타리무의 수량 감소를 초래하지 않았으며 통계적으로 유의한 차이는 없었지만 수량의 증수를 보였다. 결론적으로 바닥재는 축분퇴비와 혼합하여 사용된다면 밭토양 내 중금속 함량의 증대와 작물수량의 감소 없이 토양의 화학적 특성과 효소활성을 개량할 수 있는 것으로 조사되었다.

## Acknowledgment

This work was supported by a 2-Year Research Grant of Pusan National University.

## References

- Adriano, D.C., Woodford, T.A., Ciravolo, T.G., 1978. Growth and elemental composition of corn and bean seedlings as influenced by soil application of coal ash. *J. Environ. Qual.* 7, 416-421.
- Adriano, D.C., Page, A.L., Elseewi, A.A., Chang, A.C., Straughan, I., 1980. Utilization and disposal of fly ash and other coal residues in terrestrial ecosystem, *J. Environ. Qual.* 9, 333-334.
- Adriano, D.C., 2001. *Trace elements in terrestrial environments; biogeochemistry, bioavailability and risks of metals*, p. 866, 2nd ed. Springer, New York, USA.
- Allison, L.E., 1965. Organic carbon, in: Black, C.A. (Eds), *Methods of soil analysis*, Am Soc Agron Inc. Publ, Madison, WI, USA, pp. 1367-1376.
- Błońska, E., 2010. Enzyme Activity in Forest Peat Soils. *Folia Forestalia Polonica* 52, 20-25.
- Bolan, N.S., Adriano, D.C., Duraisamy, P., Mani, A., 2003. Immobilization and phytoavailability of cadmium in variable charge soils. III. Effect of biosolid compost addition, *Plant Soil* 256, 231-241.
- Bremner, J.M., 1965. *Total nitrogen. In Methods of Soil Analysis*, Black, C.A.(Eds), Am. Soc. Agron. Inc. Publ., Madison, WI, USA, pp. 1149-1178.
- Druzina, V.D., Miroshchachenko, E.D., Chertov, O.D., 1983. Effect of industrial pollution on nitrogen and ash content in meadow phytocoenotic plants, *Bot. Zh.* 68, 1583-1591.
- Eivazi, F., Tabatabai, M.A., 1977. Phosphatases in soils, *Soil Biology and Biochemistry* 9, 167-172.
- Elseewi, A.A., Grimm, S.R., Page, A.L., Straughan, I.R., 1981. Boron enrichment of plants and soils treated with coal ash, *J. Plant Nutr.* 3, 409-427.
- Garcia, C., Hernandez, T., Costa, C., Ceccanti, B., Masciandro, G., Gardi, C., 1992. A study of biochemical parameters of composted and fresh municipal wastes, *Biores. Technol.* 44, 17.
- Huang, T.C., Chen, D.H., 1992. Variations of ammonium ion concentration and solution pH during the hydrolysis of urea by urease, *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 55, 45.
- Krebs, R., Gupta, S.K., Furrer, G., Schulin, R., 1998. Solubility and plant uptake of metals with and without liming of sludgeamended soils, *J. Environ. Qual.* 27, 18-23.
- Kim B.j., Back J.h., Kim Y.S., 1997. Effect of fly ash on the yield chinese and chemical properties of soil.



- Korean Society of Soil Science and Fertilizer* 30, 161-167.
- Kim, H.S., Kim J.K., Park S.W., Lee H.D., Kim S.C., 2013. Lithium content monitoring of coal-fired power plants by coal ash, *Korea society of waste management* 1, 181.
- Klammer, M.R.S., Knapp, B., Aichberger, K., Insam, H., 2006. Long-term effects of compost amendment of soil on functional and structural diversity and microbial activity, *Soil Use and Management* 22, 209-218.
- Lai, K.M., Ye, D.Y., Wong, J.W.C., 1999. Enzyme Activities in a Sandy Soil Amended with Sewage Sludge and Coal Fly Ash, *Water, Air, and Soil Pollution* 113, 261-272.
- Lo, H.M., Lin, K.C., Liu, M.H., Pai, T.Z., Lin, C.Y., Liu, W.F., Fang, G.C., Lu, C., Chiang, C.F., Wang, S.C., Chen, P.H., Chen, J.K., Chiu, H.Y., Wu, K.C., 2009. Solubility of heavy metals added to MSW, *Journal of Hazardous Materials* 161 294-299.
- Merrington, G., Madden, C., 2000. Changes in cadmium and zinc phytoavailability in agricultural soil after amendment with papermill sludge and biosolid, *Commun. Soil Sci. Plant. Anal* 31, 759-776.
- Mersi, W., Schinner, F., 1991. An improved and accurate method for determining the dehydrogenase activity of soils with iodinitrotetrazolium chloride, *Biol. Fertil. Soils* 11, 216-220.
- Mittra, B.N., Karmakar, S., Swain, D.K., Ghosha, B.C., 2005. Fly ash-a potential source of soil amendment and a component of integrated plant nutrient supply system, *Fuel* 84, 1447-1451.
- Moeskops, B., Buchan, D., Sleutel, S., Herawaty, L., Husen, E., Saraswati, R., Setyorini, D., De Neve, S., 2010. Soil Microbial Communities and Activities Under Intensive Organic and Conventional Vegetable Farming In West Java Indonesia, *Applied Soil Ecology* 45, 112-120.
- Moliner, A.M., Street, J.J., 1982. Effect of fly ash and lime on growth and composition of corn (*Zea mays* L.) on acid sandy soils, *Soil Crop Sci. Soc. Fla. Proc.* 41, 217-220.
- Murphy, J., Riley, J.P., 1962. A modified single solution method for determination of phosphate in natural waters, *Anal. Chim. Acta.* 27, 31-36.
- Nair, A., Ngouajio, M., 2012. Soil microbial biomass, functional microbial diversity, and nematode community structure as affected by cover crops and compost in an organic vegetable production system, *Applied Soil Ecology* 58, 45-55.
- Nayak, D.R., Babu, Y.J., Adhya, T.K., 2007. Long-term application of compost influences microbial biomass and enzyme activities in a tropical Aerobic Endoaquept planted to rice under flooded condition, *Soil Biology Biochemistry* 39, 1897-1906.
- Nelson, D.W., Sommers, L.E., 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In *Methods of Soil Analysis*, Sparks, D.L., (Eds), Chapter 34 Total Carbon, Organic Carbon, and Organic Matter Madison, WI, USA, pp. 961-1010.
- Nybroe, O., Jorgensen, P.E., Henze, M., 1992. Enzyme activities in waste water and activated sludge, *Water Res.* 26, 579.
- Page, A.L., Elseewi, A.A., Straughan, I.R., 1979. Physical and chemical properties of fly ash from coal-fired power plants with reference to environmental impacts, *Residue Rev.* 71, 83-120.
- Park, S., Hausinger, R.P., 1995. Requirement of carbon dioxide for in vitro assembly of the urease nickel metallocenter, *Science* 267, 1156.
- Patra, K.C., Rautray, T.R., Nayak, P., 2012. Analysis of grains grown on fly ash treated soils, *Applied Radiation and Isotopes* 70, 1797-1802
- Pierzynski, G.M., Schwab, A.P., 1993. Bioavailability of zinc, cadmium and lead in a metal contaminated alluvial soil, *J. Environ. Qual.* 22, 247-254.
- Sardans, J., Penuelas, J., 2005. Drought decreases soil enzyme activity in a Mediterranean *Quercus ilex* L. forest, *Soil Biol. Biochem.* 37, 455-461.
- Wadman, W.P., Sluijsmans, C.M.J., de la Lande Cremer, L.C.N., 1987. Value of animal manures: changes in perception. in: van der Meer, H.G. (Eds), *Animal Manure on Grassland and Fodder Crops. Fertilizer or Waste? Martinus Nijhoff Pub.*, Dordrecht, the Netherlands, pp. 1-16.
- Wang, Z.G., Guo, Y., Li, L.Y., 1990. A study of phosphatase activity in anaerobic sludge digestion, *Water Res.* 24, 917.
- Wong, M.H., Wong, J.W.C., 1989. Germination and seedling growth of vegetable crops in fly ash amended soils, *Agr. Ecosyst. Environ.* 26, 23-35.