

친환경 유기농자재 처리에 따른 정화토양의 개선 효과*

김동진*** · 안병구**** · 이진호**

Impact of Environmentally-friendly Organic Agro-Materials on Chemical Properties of Remediated Soils

Kim, Dong-Jin · Ahn, Byung-Koo · Lee, Jin-Ho

Soil contamination has continuously increased worldwide, thus the remediation for the contaminated soils has risen steadily. However, the consideration of ecological safety for the remediated soils and their agricultural uses has been very limited. Therefore, this study was to investigate the influences of selected environmentally-friendly agricultural materials, organic by-product fertilizer (OF), charcoal (CC), and biochar (BC), as soil conditioners for improving poor chemical properties of fuel-oil removed soil by land farming technique. Two different remediated soils, remediated soil A (RSA) and remediated soil B (RSB), were selected. Soil texture of both RSA and RSB was sandy loam. The chemical properties of RSA and RSB were as follows: soil pHs of 8.5 and 8.7, soil organic matter contents of 7.4 and 5.5g kg⁻¹, total nitrogen contents of 0.26 and 0.10g kg⁻¹, available phosphorus concentrations of 7.2 and 4.4mg kg⁻¹, and exchangeable calcium concentrations of 14.8 and 11.7cmol_c kg⁻¹, respectively. Results of the properties were not reached for the optimal values for cultivating crops that were recommended by National Academy of Agricultural Science at Rural Development Administration in Korea. However, after applying OF, CC, and BC, the chemical properties of soils were selectively improved, which were that soil organic matter content and available phosphorus concentration increased, whereas the soil pH were not changed. In particular, the chemical properties were positively changed more with the application of 5.0% biochar. Thus, continuous management of the remediated soils with applying the eco-friendly agricultural materials can improve the quality of remediated soils.

* 본 연구는 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. NRF-2012 R1A1A2007217).

** Corresponding author, 전북대학교 생물환경화학과(E-mail : jinholee@jbnu.ac.kr)

*** 전북대학교 대학원 농화학과

**** 전라북도농업기술원 기후변화대응과

Key words : *remediated soil, organic by-product fertilizer, charcoal, biochar, chemical properties*

I. 서 론

토양은 농산물의 생산, 안식처 제공, 자원의 공급 및 인간 건강에 있어서 매우 중요하다 (Abrahams, 2002). 일반적으로 토양은 평형 상태를 유지하고 있으나 그 정화 능력을 초과할 경우 오염이 진행되게 되고, 오염원에 노출되어 오염이 진행되게 되면 정화 과정이 매우 복잡하고 어려우며 많은 비용이 소요되게 된다. 따라서 사전 예방이 가장 중요하며, 오염된 토양에 대해서는 오염원에 따른 효율적인 관리와 정화기술이 적용되고, 정화 후 정화토양에 대한 지속적인 관리와 개선이 필요하다(Yang과 Lee, 2007). 그리고, 여러 가지 정화 및 복원 기술에 의하여 정화된 토양은 단순 매립, 쓰레기 매립지 매립, 도로 공사 또는 산업 현장 노반 등에 주로 사용되고 있는 실정이며, 이렇게 환경으로 되돌려질 경우 제2차 오염을 야기하여 환경적 문제를 일으킬 수도 있다(Elgh-Dalgren 등, 2011; van Hees 등, 2008). 외국의 경우 최근 정화토양에 대한 용출 특성 연구(Elgh-Dalgren 등, 2011), 정화토양을 이용한 폐유 sludge의 생물학적 복원 연구(Makadia 등, 2011) 등이 보고된바 있다. 그러나 국내의 경우, 토양환경보전법이 제정 및 시행된 1996년부터 오염된 토양의 정화사업이 시작되었으며, 벧짚재를 이용한 유류오염토양 정화(Jeong과 Jang, 2003), 초음파세척을 이용한 오염토양 내 석유계총탄화수소(total petroleum hydrocarbon, TPH) 및 중금속 제거(Jung 등, 2009), 토양미생물 복원제를 이용한 유류 오염토양 복원(Hong 등, 2011), 안정화제 처리에 따른 중금속 오염 농경지 복원의 효율성 평가(Oh 등, 2011), 정화토양 및 배출가스의 특성을 통한 저온열탈착장치의 현장 적용성 평가(Oh 등, 2012) 등 정화기술 개발을 바탕으로 토양 정화 수준에서 연구가 이루어지고 있다. 이러한 토양정화 기술이 오염토양에 적용되어 정화된 토양은 물리적, 화학적, 생물학적 변화와 변형이 수반되며, 적용된 정화기술에 따라 상이한 토양 특성을 보이게 된다(Yang과 Lee, 2007; Kim 등, 2008). 이러한 정화토양을 환경으로 되돌려 생태적으로 안전하고 농업적 측면에서 활용하기 위해서는 친환경적인 관리와 개선이 이루어져야 하는데, 토양개량제로서 친환경농자재인 부산물비료, charcoal, biochar 등을 이용할 수 있다. 부산물비료는 친환경농업에 있어서 토양 유기물 공급뿐만 아니라 양분 공급 효과를 기대할 수 있는 유기자원 중 하나로 평가 받고 있고(Grandy 등, 2002; Yun 등, 2010; Oh 등, 2011), charcoal은 토양 유기물 함량 증가 및 작물 생산과 관련된 토양 특성을 개선하는데 있어서 효과적이며(Omil 등, 2013), biochar는 탄소 격리, 토양 유기물 증가, 토양의 물리성 및 화학성 개선에 기여하는 것으로 알려져 있다(Bell 등, 2011; Free 등, 2010; Jones 등, 2012; Novak 등, 2009; Yeboah 등, 2009). 환경통계연감(2012)에 따르면 2006

년부터 2011년까지 토양 주요 오염원인 카드뮴(cadmium, Cd), 구리(copper, Cu), 납(lead, Pb), 석유계총탄화수소(total petroleum hydrocarbon, TPH) 등의 오염도가 매년 꾸준히 증가하고 있다. 그리고 오염부지의 증가와 함께 현행 토양환경보전법이 점차 강화됨에 따라 오염토양 정화사업은 확대되고 있는 실정이다(Kwak, 2007; Yang과 Lee, 2007). 그러나, 정화토양의 생태안전성 및 질 개선 문제를 해결할 수 있는 연구는 매우 미흡한 실정이며, 안전한 재활용을 위한 정화토양의 관리 및 개선 방안을 시급히 마련할 필요가 있다. 이러한 정화토양의 질을 개선하여 생태건전성을 확보하고, 이를 이용함에 있어 장기적으로 정화토양은 농학적인 관점에서 필수적으로 다루어져야 한다. 따라서, 본 연구에서는 정화토양의 특성을 조사하여 토질 개선 지표를 마련하고, 친환경농자재인 부산물 비료, charcoal, biochar를 토양개량제로서 정화토양에 적용하여 토양의 특성 변화를 조사하며, 토양개량제의 활용 기준을 설정하는 데에 있어 기초자료를 확보하여, 농업적 토양으로서 활용 가능성을 평가하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 토양 및 시험재료

오염토양 전문 복원업체에서 석유계총탄화수소(total petroleum hydrocarbons, TPH)로 오염된 토양을 토양경작법(land farming)으로 정화한 특성이 다른 2종류의 토양 RSA(remediated soil A)와 RSB(remediated soil B)을 시료로 사용하였다. 정화토양 시료 RSA와 RSB는 풍건 후 쇄토하여 2.0mm 토양체를 통과시킨 시료를 실험에 사용하였다. 실험에 사용된 토양의 물리·화학적 특성은 Table 1에 나타나 있다. 또한 정화토양에 처리한 친환경 토양개량제로는 자체 개발한 부산물비료, 강원도 홍천 참숯가마에서 구입한 charcoal, 350℃에서 slow pyrolysis 조건으로 제조한 biochar를 사용하였으며, 이들의 화학적 특성은 Table 2와 같다.

Table 1. Selected chemical and physical properties of soils studied

Soils ¹⁾	RSA	RSB
pH (H ₂ O, 1:5)	8.5	8.7
EC (dS m ⁻¹)	1.54	0.77
SOM ²⁾ (g kg ⁻¹)	7.4	5.5
T-N (g kg ⁻¹)	0.26	0.10
Avail. P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	7.2	4.4

Soils ¹⁾		RSA	RSB
Exch. cations (cmolc kg ⁻¹)	K ⁺	0.16	0.13
	Ca ²⁺	14.8	11.7
	Mg ²⁺	1.2	2.8
	Na ⁺	0.10	0.14
CEC (cmolc kg ⁻¹)		7.9	8.8
Total heavy metals (mg kg ⁻¹)	Cd	3.18	7.51
	Cu	26.2	49.0
	Ni	11.7	24.0
	Pb	21.7	13.3
	Zn	68.5	72.8
TPH (mg kg ⁻¹)		ND ⁴⁾	ND
Particle size distribution (%)	Sand	65.9	72.6
	Silt	17.4	15.3
	Clay	16.7	12.1
Soil texture ³⁾		SL	SL

¹⁾ RSA, remediated soil A; RSB, remediated soil B.

²⁾ SOM, soil organic matter; T-N, total-nitrogen; CEC, cation exchange capacity; TPH, total petroleum hydrocarbons.

³⁾ SL is indicated sandy loam in soil texture.

⁴⁾ ND, not detected.

Table 2. Characteristics of different organic agricultural materials as soil conditioners

Soil conditioners	Organic by-product fertilizer (OF)	Charcoal (CC)	Biochar (BC)
pH (H ₂ O, 1:5)	8.9	10.2	7.4
EC (dS m ⁻¹)	10.4	7.4	0.8
OM ¹⁾ (%)	80.6	55.2	64.9
T-N (g kg ⁻¹)	3.50	1.87	3.81
P (g kg ⁻¹)	1.09	1.35	1.06
K (g kg ⁻¹)	8.69	5.07	2.27
Ca (g kg ⁻¹)	4.59	16.98	1.21
Mg (g kg ⁻¹)	2.23	0.46	0.30

Soil conditioners	Organic by-product fertilizer (OF)	Charcoal (CC)	Biochar (BC)
Na (mg kg ⁻¹)	341	121	ND2)
Fe (g kg ⁻¹)	11.80	0.07	0.46
Mn (mg kg ⁻¹)	146.6	17.1	172.4
Cu (mg kg ⁻¹)	50.39	0.71	2.11
Zn (mg kg ⁻¹)	149.8	2.0	19.0
Cd (mg kg ⁻¹)	1.68	ND	ND
Ni (mg kg ⁻¹)	7.03	ND	ND
Pb (mg kg ⁻¹)	7.65	ND	0.86

¹⁾ OM, organic matter; T-N, total-nitrogen.

²⁾ ND, not detected.

2. 처리 및 시험방법

정화토양 RSA와 RSB 400g을 각각 500mL polypropylene bottle에 칭량한 후, 부산물비료 (organic by-product fertilizer, OF), charcoal(CC), biochar(BC)를 건조토양 무게 당 각각 0%, 1.0%, 5.0% 수준으로 처리하였고, 탈이온수(deionized water, 18.2 M Ω)를 이용하여 포장용수 량 수준으로 수분함량을 조절하였으며, 통기를 용이하게 하여 상온(24 \pm 2 $^{\circ}$ C)에서 32주 동안 incubation한 후 풍건하여 분석에 사용하였다.

3. 토양 분석

시험에 사용된 토양의 물리적 특성인 토성(soil texture)은 Gee와 Bauder(1986)의 피펫 침강법에 준하여 분석하였으며, 토양의 화학적 특성은 농업과학기술원의 토양분석법에 준하여 실시하였다 (NAAS, 2010). 토양의 pH와 전기전도도(electrical conductivity, EC)는 풍건토 양과 증류수를 1:5(w/v) 비율로 혼합하여 pH&EC meter(Professional Meter PP-20, Sartorius, Germany)로 측정하였다. 토양유기물(soil organic matter, SOM) 함량은 Tyurin's법, 총질소 (total nitrogen, T-N) 함량은 Kjeldahl 증류법(Vapodest 10s, Gerhardt, German)을 이용하여 분석하였고, 유효인산(available phosphorus, avail. P)은 Lancaster법으로 발색하여 UV/Vis Spectrophotometer(DU 720, Beckman Coulter, USA)로 측정하였다. 치환성 양이온(exchangeable cations)은 1.0N CH₃COONH₄(pH 7.0)으로 추출하여 Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry(ICP-OES, Optima 7300DV, Perkin Elmer, USA)로 측정하였고, 양이온

치환용량(cation exchange capacity, CEC)은 ammonium acetate법을 이용하였다. 토양 중 중금속 함량은 왕수(aqua regia) 추출법(ISO 11466, 1995)을 응용하여 Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES, Optima 7300DV, Perkin Elmer, USA)로 정량하였다. 그리고, 토양 중 석유계총탄화수소(total petroleum hydrocarbons, TPH)는 토양오염공정시험기준(MOE, 2012a)에 따라 분석하였다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

정화토양 RSA(remediated soil A)와 RSB(remediated soil B)의 물리·화학적 특성을 조사한 결과, 토성은 두 토양 모두 사질양토(sandy loam)로 분류 되었으며, RSA는 pH 8.5, EC 1.54dS m⁻¹, 토양유기물 함량 7.4g kg⁻¹, 총질소 함량 0.26g kg⁻¹, 유효인산 함량 7.2mg kg⁻¹, 치환성 칼륨 0.16cmol_c kg⁻¹, 치환성 칼슘 14.8cmol_c kg⁻¹, 치환성 마그네슘 1.2cmol_c kg⁻¹, 치환성 나트륨 0.10cmol_c kg⁻¹, 양이온치환용량(CEC) 7.9cmol_c kg⁻¹으로 나타났으며, RSB는 pH 8.7, EC 0.77dS m⁻¹, 토양유기물 함량 5.5g kg⁻¹, 총질소함량 0.10g kg⁻¹, 유효인산 함량 4.4mg kg⁻¹, 치환성 칼륨 0.13cmol_c kg⁻¹, 치환성 칼슘 11.7cmol_c kg⁻¹, 치환성 마그네슘 2.8cmol_c kg⁻¹, 치환성 나트륨 0.14cmol_c kg⁻¹, CEC는 8.8cmol_c kg⁻¹을 보였다. 그리고, 중금속 및 석유계총탄화수소(TPH) 함량은 RSA의 경우 카드뮴(Cd) 3.18mg kg⁻¹, 구리(Cu) 26.2mg kg⁻¹, 니켈(Ni) 11.7mg kg⁻¹, 납(Pb) 21.7mg kg⁻¹, 아연(Zn) 68.5mg kg⁻¹, 함유하였으며, RSB는 Cd 7.51mg kg⁻¹, Cu 49.0mg kg⁻¹, Ni 24.0mg kg⁻¹, Pb 13.3mg kg⁻¹, Zn 72.8mg kg⁻¹ 검출되었으며, 두 토양 모두에서 TPH는 검출되지 않았다(Table 1). 토양환경보전법(MOE, 2012b)의 토양오염우려기준에서 RSA는 Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, TPH 모두 1지역 기준(Cd, 4mg kg⁻¹; Cu, 150mg kg⁻¹; Ni, 100mg kg⁻¹; Pb, 200mg kg⁻¹; Zn, 300mg kg⁻¹; TPH, 500mg kg⁻¹) 이하로 나타났으며, RSB의 경우 Cd는 2지역 기준(Cd, 10mg kg⁻¹; Cu, 500mg kg⁻¹; Ni, 200mg kg⁻¹; Pb, 400mg kg⁻¹; Zn, 600mg kg⁻¹; TPH, 800mg kg⁻¹) 이하, Cu, Ni, Pb, Zn, TPH는 1지역 기준 이하로 나타났다. RSA와 RSB의 토양에서 TPH가 검출되지 않은 것은 토양경작법(land farming)으로 정화 후 오랜 기간 풍건 및 쇄토 과정에서 휘발 및 분해가 일어났기 때문으로 생각된다. 실제로, 토양경작법은 TPH 오염 토양을 정화부지로 이동 후 정기적으로 영양분과 수분을 처리하고 공기와의 접촉면을 증진시키는 tilling 작업을 통하여 영양세균의 번식을 증가시켜 TPH의 생분해를 증진시키고 휘발을 증가시킴으로써 TPH 농도를 감소시킨다(Paudyn 등, 2008). Reynolds 등(1994)의 연구에 의하면, 미국 Arkansas주 Fairbandks 인근의 경우 오염 지역을 토양경작법을 이용하여 정화한 결과 7주 후 TPH 농도가 6,200mg kg⁻¹에서 280mg kg⁻¹으로 감소한바 있고, Wingrov(1997)는 캐나다 Manitoba 주의 Pukatawagan 인근의 경우 오염지를 토양경작법으로 정화하였는데 13,000mg kg⁻¹ 이상의 TPH 농도가 250mg kg⁻¹ 이하로 감소하

였다고 보고하였다.

국립농업과학원(NAAS, 2010)에서 권장하는 작물 별 적정 토양 특성을 살펴보면(Table 3), 토양 pH는 6.0~7.0, 토양유기물 함량은 20~35g kg⁻¹, 유효인산 함량 150~550mg kg⁻¹, 치환성 칼륨 0.30~0.85cmol_c kg⁻¹, 치환성 칼슘 4.0~7.0cmol_c kg⁻¹, 치환성 마그네슘 1.0~2.5cmol_c kg⁻¹, CEC 10~15cmol_c kg⁻¹, 토성은 사질양토에서 미사질식양토로 권장하고 있다. 그러나 정화토양 RSA와 RSB의 주요 화학적 특성과 작물 재배를 위한 적정 토양특성을 비교할 때, 토양 pH와 치환성 칼슘은 높으며, CEC와 치환성 칼륨은 다소 낮고, 토양유기물 함량과 유효인산 함량은 매우 낮아 작물 생육에 적정하지 않은 화학적 특성을 보였으나, 물리적 특성인 토성은 두 정화토양의 모두 사질양토로써 적정 토성으로 나타났다. 그리고 화학적 특성 중 치환성 칼슘의 함량이 매우 높은 것은 토양경작법에 의한 정화과정 중 영양분으로써 칼슘제의 사용이 원인인 것으로 생각된다.

Table 3. Optimal soil properties for cultivating various crops in Korea (NAAS, 2010)

Crops	pH	SOM ²⁾ g kg ⁻¹	Avail. P ₂ O ₅ mg kg ⁻¹	Exch. Cations			CEC	Soil Texture ³⁾
				K	Ca	Mg		
	(1:5)	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	----- cmol _c kg ⁻¹ -----				
RSA ¹⁾	8.5	7.4	7	0.16	14.8	1.2	7.9	SL
RSB	8.7	5.5	4	0.13	11.7	2.8	8.8	SL
Apple	6.0~6.5	25~35	200~300	0.30~0.60	5.0~6.0	1.5~2.0	10~15	SL~CL
Barley	6.5~7.0	20~30	150~250	0.45~0.55	6.0~7.0	2.0~2.5	10~15	SL~SiL
Bean	6.5~7.0	20~30	150~250	0.45~0.55	6.0~7.0	2.0~2.5	10~15	SL~SiCL
Broccoli	6.0~6.5	25~35	350~450	0.40~0.60	5.0~6.0	1.5~2.0	10~15	SL~CL
Cabbage	6.0~6.5	25~35	350~450	0.70~0.80	5.0~6.0	1.5~2.0	10~15	SL~CL
Carrot	6.0~6.5	20~30	250~350	0.55~0.65	5.0~6.0	1.5~2.0	10~15	L~CL
Chestnut	6.0~6.5	25~35	200~300	0.30~0.60	5.0~6.0	1.5~2.0	10~15	SL~CL
Chinese cabbage	6.0~6.5	25~35	350~450	0.65~0.80	5.0~6.0	1.5~2.0	10~15	SL~CL
Chives	6.0~6.5	25~35	350~450	0.70~0.80	5.0~6.0	1.5~2.0	10~15	SL~CL
Corn	6.0~6.5	20~30	150~250	0.45~0.55	5.0~6.0	1.5~2.0	10~15	SL~SiCL
Cucumber	6.0~6.5	20~30	400~500	0.70~0.80	5.0~6.0	1.5~2.0	10~15	SL~CL
Eggplant	6.0~6.5	20~30	400~500	0.70~0.80	5.0~6.0	1.5~2.0	10~15	SL~CL
Garlic	6.5~7.0	25~35	300~400	0.70~0.80	6.0~7.0	2.0~2.5	10~15	SL~CL
Ginger	6.0~6.5	20~30	250~350	0.50~0.60	5.0~6.0	1.5~2.0	10~15	SL~CL
Grape	6.0~6.5	25~35	200~300	0.30~0.60	5.0~6.0	1.5~2.0	10~15	SL~CL

Crops	pH	SOM ²⁾	Avail. P ₂ O ₅	Exch. Cations			CEC	Soil Texture ³⁾
	(1:5)	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	K	Ca	Mg		
	----- cmol _c kg ⁻¹ -----							
Jujube	6.0~6.5	25~35	300~400	0.40~0.80	4.0~7.0	1.0~2.0	10~15	SL~CL
Leek	6.0~6.5	20~30	300~400	0.40~0.60	5.0~6.0	1.5~2.0	10~15	SL~CL
Lettuce	6.5~7.0	20~30	250~400	0.40~0.60	6.0~7.0	2.0~2.5	10~15	SL~CL
Onion	6.0~6.5	25~35	350~450	0.70~0.80	6.0~7.0	2.0~2.5	10~15	SL~CL
Oriental melon	6.0~6.5	20~30	350~450	0.70~0.80	5.0~6.0	1.5~2.0	10~15	SL~CL
Paprika	6.0~6.5	25~35	450~550	0.70~0.80	5.0~6.0	1.5~2.0	10~15	SL~CL
Peach	6.0~6.5	25~35	200~300	0.30~0.60	5.0~6.0	1.5~2.0	10~15	SL~CL
Peanut	6.5~7.0	20~30	150~250	0.45~0.85	6.0~7.0	1.5~2.0	10~15	SL
Pear	6.0~6.5	25~35	200~300	0.30~0.60	5.0~6.0	1.5~2.0	10~15	SL~CL
Pepper	6.0~6.5	25~35	450~550	0.70~0.80	5.0~6.0	1.5~2.0	10~15	SL~CL
Perilla	6.0~6.5	20~30	250~350	0.40~0.60	5.0~6.0	1.5~2.0	10~15	SL~CL
Persimmon	6.0~6.5	25~35	200~300	0.30~0.60	5.0~6.0	1.5~2.0	10~15	SL~CL
Potato	5.5~6.2	20~30	250~350	0.50~0.60	4.5~5.5	1.5~2.0	10~15	SL~CL
Radish	6.0~6.5	20~30	350~450	0.60~0.70	5.0~6.0	1.5~2.0	10~15	L~CL
Rape	6.0~6.5	30~50	150~250	0.45~0.85	6.0~7.0	1.5~2.0	10~15	SL~SiCL
Rice	5.5~6.5	25~30	80~120	0.25~0.30	5.0~6.0	1.5~2.0	10~15	SL~CL
Sesame	6.0~6.5	20~30	150~250	0.45~0.55	5.0~6.0	1.5~2.0	10~15	SL~CL
Spinach	6.5~7.0	20~30	350~450	0.45~0.60	6.0~7.0	2.0~2.5	10~15	SL~CL
Strawberry	6.0~6.5	20~30	350~450	0.70~0.80	5.0~6.0	1.5~2.0	10~15	SL~CL
Sweet potato	6.0~6.5	20~30	250~350	0.55~0.65	5.0~6.0	1.5~2.0	10~15	SL~CL
Tomato	6.0~6.5	20~30	400~500	0.70~0.80	5.0~6.0	1.5~2.0	10~15	SiCL
Watermelon	6.0~6.5	20~30	350~450	0.70~0.80	5.0~6.0	1.5~2.0	10~15	SL~CL
Wheat	6.5~7.0	20~30	150~250	0.45~0.55	6.0~7.0	2.0~2.5	10~15	SL~SiL

¹⁾ RSA, remediated soil A; RSB, remediated soil B; SCL, sandy clay loam; C, clay.

²⁾ SOM, soil organic matter; CEC, cation exchange capacity.

³⁾ SL, sandy loam; CL, clay loam; SiL, silty loam; SiCL, silty clay loam; L, loam.

토양개량제로 친환경농자재인 부산물비료(organic by-product fertilizer, OF), charcoal(CC), biochar(BC)를 정화토양 RSA와 RSB에 처리하고 32주가 지난 후 토양의 화학적 특성 변화를 조사한 결과, pH는 RSA에서 무처리구는 8.6, BC 5% 처리구는 8.4를 보였으며, RSB에서는 무처리구는 8.9, BC 5% 처리구는 8.5로 나타났다. BC 5% 처리구에서 약간 감소하였으

나 토양개량제 처리가 pH 변화에 큰 영향을 주지는 못하였다(Table 4). 이는 토양의 완충(buffering) 작용으로 인하여 토양 pH가 쉽게 변하지 않은 것으로 보이며(Brady와 Weil, 2003), Ludwig 등(2001)의 연구에서도 Amazonian Ultisol에 OH⁻ 또는 H⁺ 처리 시 일정 수준에서 pH의 변화가 발생하지 않은 것은 pH에 대한 완충력 때문이라고 하였다. EC의 변화는 RSA의 무처리구에서 1.72dS m⁻¹, BC 5% 처리구는 1.42dS m⁻¹로 나타났고, RSB의 무처리구에서는 0.73dS m⁻¹, BC 5% 처리구에서 0.60dS m⁻¹을 보였는데, 처리구에 따라 약간 감소한 경우가 발견되었으나, 대체적으로 뚜렷한 변화가 나타나지 않았다(Table 4). 이러한 결과는 각 토양개량제의 EC 값 중 OF 처리구는 10.4dS m⁻¹, CC 처리구는 7.4dS m⁻¹, BC 처리구는 0.8dS m⁻¹로서 OF가 상당히 높은 EC 값을 나타남에도 불구하고 1.0% 및 5.0%의 처리 범위에서는 토양개량제 처리에 따라 뚜렷한 차이가 나타나지 않는다고 보여진다. 이러한 결과는 우리나라 토양 적정 EC 값이 2.0dS m⁻¹ 이하인 것으로 볼 때(Jung 등, 1998) 정화토양 RSA와 RSB의 pH가 높은 것을 감안할 때 EC 값의 변화에 차이가 없다는 것은 긍정적으로 평가할 수 있다. 토양유기물 함량은 RSA에서 무처리구는 7.4g kg⁻¹, BC 5% 처리구는 17.9g kg⁻¹를 보였고, RSB는 무처리구에서 6.7g kg⁻¹, BC 5% 처리구는 19.9g kg⁻¹로 나타났는데, 토양개량제 처리에 따라 유기물 함량은 증가하였다(Table 4). 유기물 함량의 증가는 OF(유기물 80.6%), CC(유기물 55.2%), BC(유기물 64.9%)의 높은 유기물 함량에 기인한 것으로 생각되며, BC 처리구가 매우 높은 유기물 함량 증가를 보였다. Lee 등(2012)의 연구에서 부산물비료 및 액비 시용이 토양유기물 증가에 영향을 주었으며, Jones 등(2012)의 BC 처리가 토양 특성에 미치는 영향 연구에서 또한 토양 탄소 함량을 증가시켰다. 총질소 함량 변화는 RSA에서 무처리구는 0.27g kg⁻¹, BC 5% 처리구는 0.43g kg⁻¹를 보였고, RSB는 무처리구에서 0.10g kg⁻¹, BC 5% 처리구에서 0.33g kg⁻¹로 나타났는데, 총질소 함량은 토양개량제 처리에 따라 약간 증가하였으며, BC 5% 처리구에서 상대적으로 높은 증가를 보였다(Table 4). Hwang 등(2002)의 연구에 의하면 부산물비료 시용에 따라 토양 중 질산태 질소 함량이 증가한 것을 알 수 있었으며, 정화토양 RSA(T-N, 0.26g kg⁻¹)와 RSB(T-N, 0.10g kg⁻¹)는 일반 토양에 비하여 상대적으로 낮은 질소를 함유하고 있어 토양개량제인 OF, CC, BC 처리 후에 질소 함량이 약간의 증가를 보인 것으로 생각된다. 유효인산 함량은 RSA에서 무처리구(6.9mg kg⁻¹)에 비하여 BC 5% 처리구는 24.5mg kg⁻¹로서 가장 높은 증가를 보였고, RSB에서도 무처리구(4.7mg kg⁻¹)보다 BC 5% 처리구에서 17.5mg kg⁻¹로서 가장 높게 나타났다(Table 4). 유효인산 함량은 OF 5% 처리구와 BC 처리구에서 증가를 보였는데, BC 5% 처리구에서 높은 증가를 보였다. 그러나, 국립농업과학원(NAAS, 2010)에서 제안하는 작물 별 유효인산 권장 함량인 150~550mg kg⁻¹에는 현저히 부족한 것으로 보인다. Hwang 등(2002)의 연구와 Yun 등(2009)의 연구에 따르면 부산물비료 처리 후 토양 중 유효인산의 함량이 증가한 것을 알 수 있었다. 그러나 CC 처리구의 경우 유효인산의 함량이 무처리구에 비하여 감소하거나 변화가 없는 것으로 나타났는데, 이는 염기성토양에서 인산이온(H₂PO₄⁻, HPO₄⁻²)이 칼

습과의 fixation으로 인하여 용해도가 감소하였기 때문으로 보인다(Raven과 Hossner, 1993; Lee와 Doolittle, 2004). CC 처리구는 OF(Ca, 4.59 g kg⁻¹)나 BC(Ca, 1.21g kg⁻¹) 처리구에 비하여 상대적으로 높은 칼슘 함량(16.98g kg⁻¹)을 보유하고 있어(Table 2), RSA와 RSB의 CC 5% 처리구에서 치환성 칼슘이 3302mg kg⁻¹, 2944mg kg⁻¹로서 BC 5% 처리구보다 (RSA, 2236mg kg⁻¹; RSB, 2081mg kg⁻¹) 높은 함량을 나타내었다(Table 4). 그리고, 치환성 칼륨은 RSA에서 무처리구(54.7mg kg⁻¹)에 비하여 OF 처리구에서 낮은 증가를 보였으나 CC 5% 처리구에서 100.3mg kg⁻¹, BC 5% 처리구에서 128.7mg kg⁻¹로서 매우 높은 증가를 보였고, RSB의 경우에도 무처리구(48.5mg kg⁻¹)에 비하여 CC 5% 처리구(84.6mg kg⁻¹), BC 5% 처리구(75.4mg kg⁻¹)에서 높은 증가를 보였다(Table 4). 치환성 칼슘은 RSA에서 무처리구(2591mg kg⁻¹)에 비하여 CC 5% 처리구에서 3302mg kg⁻¹로서 증가하였고, RSB에서도 무처리구(2236mg kg⁻¹)보다 CC 5% 처리구에서 2944mg kg⁻¹로서 증가를 보인 반면, BC 5% 처리구에서는 RSA와 RSB에서 각각 2236mg kg⁻¹, 2081mg kg⁻¹로서 다소 감소한 것으로 나타났다(Table 4). 치환성 마그네슘은 RSA에서 무처리구(113mg kg⁻¹)보다 BC 5% 처리구에서 140mg kg⁻¹로서 약간의 증가를 보였으나 BC 1% 및 OF, CC 처리구에서는 뚜렷한 변화가 나타나지 않았고, RSB에서는 무처리구(295mg kg⁻¹)보다 BC 5% 처리구에서 319mg kg⁻¹로서 약간 증가한 반면, BC 1% 및 OF, CC 처리구에서는 뚜렷한 차이가 보이지 않았다(Table 4). RSA의 BC 5% 처리구에서 상대적으로 높은 치환성 칼륨 함량을 보였으나 치환성 칼슘의 함량이 상대적으로 낮게 나타났는데, Li 등(2013)의 연구에서 칼륨(K) 처리에 따라 가용성 칼슘(Ca)의 함량이 감소한다고 보고하였으며, Tyler와 Olsson(2001)의 토양 산도에 따른 이온 농도의 변화에 관한 연구에서 토양 용액의 pH 조건에 따라 칼륨(K)과 칼슘(Ca)은 경쟁적 흡탈착 특성이 나타남을 밝힌바 있다. 그리고, 치환성 나트륨의 경우, RSA와 RSB에서 각각의 무처리구(20.0mg kg⁻¹, 25.5mg kg⁻¹)보다 OF 처리구와 CC 처리구에서 치환성 나트륨 함량이 증가하였는데, 이는 OF와 CC의 나트륨 함량이 각각 341mg kg⁻¹과 121mg kg⁻¹인 것(Table 2)에 기인한 것으로 생각되며, BC 처리구의 경우 BC의 나트륨 함량이 불검출임에도 치환성 나트륨의 함량이 증가하였다(Table 4). Tyler와 Olsson(2001)의 토양 산도에 따른 이온 농도의 변화에 관한 연구에서 나트륨과 칼륨은 상보적 흡탈착 특성을 보이고, 칼슘과는 경쟁적 흡탈착 특성이 나타남을 밝힌바 있는데, RSA와 RSB의 BC 처리구에서 치환성 칼륨의 함량은 증가한 반면, 치환성 칼슘의 함량은 감소하였다(Table 4). 또한, Harron 등(1983)의 연구에 의하면 Solonetzic 토양에서 나트륨은 칼슘과 상반적인 치환성을 가짐을 밝힌바 있다. 양이온치환용량(CEC) 변화의 경우, RSA에서 무처리구는 7.6cmol_c kg⁻¹, OF 5% 처리구와 BC 5% 처리구는 각각 9.3cmol_c kg⁻¹와 9.4cmol_c kg⁻¹로서 OF 5% 처리구와 BC 5% 처리구에서 증가하였고, RSB는 무처리구에서 8.4cmol_c kg⁻¹이었으나 BC 5% 처리구는 9.7cmol_c kg⁻¹로서 BC 5% 처리구에서 다소 증가하는 것으로 나타났다(Table 4). RSA와 RSB의 BC 5% 처리구에서 상대적으로 유기물함량(RSA, 17.9g kg⁻¹; RSB, 19.9g kg⁻¹)이 증가함에 따라 RSA와 RSB의 BC 5% 처리구

에서 CEC가 증가한 것으로 생각된다. 본 연구에 사용된 친환경농자재인 OF, CC, BC를 정화토양에 처리한 결과 토양의 특성 변화가 나타났으며, 토양유기물, 총질소, 인산 등의 함량이 증가된 바 지속적으로 정화토양을 꾸준히 유지하고 관리 할 경우 토양의 질을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

Table 4. Changes in chemical properties of remediated soils as affected by the application of soil conditioners after 32 weeks of incubation

Soils ¹⁾	Treatment ²⁾	pH	EC	SOM ³⁾	T-N	Avail. P ₂ O ₅	Exch. Cations				CEC
		(H ₂ O, 1:5)	dS m ⁻¹	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	K	Ca	Mg	Na	cmol _c kg ⁻¹
RSA	Control	8.6	1.72	7.4	0.27	6.9	54.7	2591	113	20.0	7.6
	OF 1	8.6	1.54	8.5	0.30	8.7	64.2	2691	120	22.3	8.2
	OF 5	8.5	1.54	12.5	0.35	13.4	76.9	2621	133	23.0	9.3
	CC 1	8.6	1.56	10.2	0.29	6.9	66.6	2573	117	21.6	7.8
	CC 5	8.6	1.58	13.4	0.34	6.7	100.3	3302	127	23.4	8.2
	BC 1	8.6	1.52	13.8	0.31	13.7	74.6	2655	128	21.9	8.2
	BC 5	8.4	1.42	17.9	0.43	24.5	128.7	2236	140	23.2	9.4
RSB	Control	8.9	0.73	6.7	0.10	4.7	48.5	2236	295	25.5	8.4
	OF 1	8.9	0.73	7.3	0.17	5.4	49.9	2266	295	26.4	8.4
	OF 5	8.8	0.76	11.3	0.29	9.0	71.2	2216	312	34.0	9.1
	CC 1	8.9	0.69	7.3	0.17	4.6	49.8	2343	284	29.4	8.2
	CC 5	9.0	0.75	8.7	0.22	6.1	84.6	2944	287	29.4	8.5
	BC 1	8.7	0.60	10.1	0.19	9.1	61.1	2199	309	29.7	9.2
	BC 5	8.5	0.60	19.9	0.33	17.5	75.4	2081	319	30.4	9.7

¹⁾ RSA, remediated soil A; RSB, remediated soil B.

²⁾ Control, no treatment; OF 1, 1% of organic by-product fertilizer treated; OF 5, 5% of organic by-product fertilizer treated; CC 1, 1% of charcoal treated; CC 5, 5% of charcoal treated; BC 1, 1% of biochar treated; BC 5, 5% of biochar treated.

³⁾ SOM, soil organic matter; T-N, total-nitrogen; CEC, cation exchange capacity.

IV. 적 요

정화토양 RSA(remediated soil A)와 RSB(remediated soil B)의 토양 특성을 조사한 결과, 사질양토로서 작물 별 토양 특성 권장 기준에 적정 토성이지만, 높은 토양 pH와 치환성 칼슘, 다소 낮은 양이온치환용량(cation exchange capacity, CEC)과 치환성 칼륨, 매우 낮은 토양유기물 함량과 유효인산 함량을 보여 작물 생육에 적합하지 않은 것으로 판단되었다. 그러나, 친환경농자재인 부산물비료, charcoal, biochar를 토양개량제로 처리 후 토양 특성이 수준 이상의 개선을 보여준 것으로 보인다. 토양 pH 경감 효과는 볼 수 없었으나, 토양유기물 함량 증가, 유효인산 함량 증가 등의 효과가 있었으며, 총질소(total nitrogen, T-N)와 치환성 칼륨의 함량이 다소 증가하였다. 그리고, 치환성 칼슘의 함량이 작물 별 권장 기준 이상으로 높은 것을 감안하였을 때 biochar 처리구에서 치환성 칼슘 함량을 감소시킨바, 지속적인 연구 또한 필요할 것으로 판단된다. 이는 토양경작법에 의하여 정화된 토양에 대하여 부산물비료, charcoal, biochar 등의 친환경농자재를 토양개량제로 사용할 경우 토양 개선 효과가 나타난 것으로 생각되며, 특히 biochar의 경우 토양 특성 변화에 많은 영향을 주었다. 따라서, 정화토양을 지속적으로 유지하고 관리 할 경우 토양의 질을 꾸준히 증진시킬 수 있을 것으로 기대된다.

[논문접수일 : 2013. 10. 14. 논문수정일 : 2013. 10. 26. 최종논문접수일 : 2013. 10. 30.]

참 고 문 헌

1. Abrahams, P. W. 2002. Soils: their implications to human health. *Sci. Total Environ.* 291: 1-32.
2. Bell, M. J. and F. Worrall. 2011. Charcoal addition to soils in NE England: A carbon sink with environmental co-benefits?. *Sci. Total Environ.* 409: 1704-1714.
3. Brady, N. C. and R. R. Weil. 2003. *Elements of the nature and properties of soils.* (2nd ed.). Pearson, Prentice Hall, New Jersey, USA.
4. Elgh-Dalgren, K., A. Duker, Z. Arwidsson, T. von Kronhelm, and P. A. W. van Hees. 2011. Re-cycling of remediated soil - Evaluation of leaching tests as tools for characterization. *Waste Manage.* 31: 215-224.
5. Free, H. F., C. R. McGill, J. S. Rowarth, and M. G. Hedley. 2010. The effect of biochar on maize (*Zea mays*) germination. *New Zealand J. Agric. Res.* 53: 1-4.

6. Gee, G. W. and J.W. Bauder. 1986. Particle size analysis, p. 383-411. In: Klute, A. Method of soil analysis part I. (2nd ed.). America Society of Agronomy, Madison, WI, USA.
7. Grandy, A. S., G. A. Porter, and M. S. Erich. 2002. Organic amendment and rotation crop effects on the recovery of soil organic matter and aggregation in potato cropping systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 1311-1319.
8. Harron, W. R. A., G. R. Webster, and R. R. Cairns. 1983. Relationship between exchangeable sodium and sodium adsorption ratio in a Solonchic soil association. *Can. J. Soil Sci.* 63: 461-467.
9. Hong, S. H., S. M. Lee, and E. Y. Lee. 2011. Bioremediation efficiency in oil-contaminated soil using microbial agents. *Korean J. Microbiol. Biotechnol.* 39(3): 301-307.
10. Hwang, K. S., Q. S. Ho, H. D. Kim, and J. H. Choi. 2002. Changes of electrical conductivity and nitrate nitrogen in soil applied with livestock manure. *Korean J. Environ. Agric.* 21(3): 197-201.
11. ISO 11466. 1995. Soil quality-extraction of trace elements soluble in aqua regia. International Organization for Standardization. Geneva, Switzerland.
12. Jeong, K. W., and S. H. Jang. 2003. Remediation of oil contaminated soils by rice straw ash. *J. Kor. Environ. Sci. Soc.* 12(7): 783-789.
13. Jones, D. L., J. Rousk, G. Edwards-Jones, T. H. DeLuca, and D. V. Murphy. 2012. Biochar-mediated changes in soil quality and plant growth in a three year field trial. *Soil Biol. Biochem.* 45: 113-124.
14. Jung, B. G., G. H. Ro, and N. C. Sung. 2009. Removal characteristics of TPHs and heavy metals in contaminated soil with ultrasonic washing. *J. Kor. Environ. Sci. Soc.* 18(4): 473-478.
15. Jung, B. G., J. W. Choi, E. S. Yun, J. H. Yoon, Y. H. Kim, and G. B. Jung. 1998. Chemical properties of the horticultural soils in the plastic film houses in Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 31(1): 9-15.
16. Kim, G. J., S. H. Lee, K. J. Park, C. K. Kim, C. H. Lee, D. S. Kim, S. H. Cho, and Y. Y. Chang. 2008. Development of low temperature thermal desorption system and remediation of soil contaminated with petroleum hydrocarbon. *J. Kor. Soc. Soil Groundwater Environ.* 13(4): 62-68.
17. Kwak, M. Y. 2007. Prospect and present status of soil environmental remediation industry. *J. Kor. Soc. Environ. Eng.* 35(3) : 151-164.
18. Lee, J. H., and J. J. Doolittle. 2004. Measurement of phosphorus buffering power in various soils using desorption isotherm. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 37(4): 220-227.

19. Lee, S. B., K. M. Cho, N. H. Baik, C. H. Yang, J. H. Jung, K. J. Kim, and G. B. Lee. 2012. Effects of pig compost and liquid manure on yield, nutrients uptake of rice plant and physicochemical properties of soil. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 45(5): 772-778.
20. Li, Y., J. Qin, N. S. Mattson, and Y. Ao. 2013. Effect of potassium application on celery growth and cation uptake under different calcium and magnesium levels in substrate culture. *Sci. Hortic.* 158: 33-38.
21. Ludwig, B., P. K. Khanna, B. Anurugsa, and H. Folster. 2001. Assessment of cation and anion exchange and pH buffering in an Amazonian Ultisol. *Geoderma* 102: 27-40.
22. Makadia, T. H., E. M. Adetutu, K. L. Simons, D. Jardine, P. J. Sheppard, and A. S. Ball. 2011. Re-use of remediated soils for the bioremediation of waste oil sludge. *J. Environ. Manage.* 92: 866-871.
23. MOE. 2012. Environmental statistics yearbook. Ministry of Environment, Korea.
24. MOE. 2012a. Standard analytical methods for soil pollution. Ministry of Environment, Korea.
25. MOE. 2012b. Soil environment conservation act. Ministry of Environment, Korea.
26. NAAS. 2010. Fertilization standard on crops. National Academy of Agricultural Science, Rural Development Administration, Korea.
27. NAAS. 2010. Methods of soil chemical analysis. National Academy of Agricultural Science, Rural Development Administration, Korea.
28. Novak, J. M., W. J. Busscher, D. L. Larid, M. Ahmedna, D. W. Watts, and M. A. S. Niandou. 2009. Impact of biochar amendment on fertility of a Southeastern Coastal Plain soil. *Soil Sci.* 174: 105-112.
29. Oh, C. T., Y. M. Yi, Y. S. Kim, W. J. Jeon, G. J. Park, C. K. Kim, K. J. Sung, Y. Y. Chang, and G. J. Kim. 2012. Field applicability of low temperature thermal desorption equipment through environmental impact analysis of remediated soil and exhaust gas. *J. Kor. Soc. Soil Groundwater Environ.* 17(3): 76-85.
30. Oh, S. J., S. C. Kim, H. S. Yoon, H. N. Kim, T. H. Kim, K. H. Yeon, J. S. Lee, S. J. Hong, and J. E. Yang. 2011. Evaluating heavy metal stabilization efficiency of chemical amendment in agricultural field : field experiment. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44(6): 1052-1062.
31. Omil, B., V. Pineiro, and A. Merino. 2013. Soil and tree responses to the application of wood ash containing charcoal in two soils with contrasting properties. *Forest Ecol. Manag.* 295: 199-212.
32. Paudyn, K., A. Rutter, R. K. Rowe, and J. S. Poland. 2008. Remediation of hydrocarbon

- contaminated soils in the Canadian Arctic by landfarming. *Cold Reg. Sci. Technol.* 53: 102-114.
33. Raven, K. P., and L. R. Hossner. 1993. Phosphorus desorption quantity-intensity relationships in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 1501-1508.
 34. Reynolds, C. M., M. D. Travis, W. A. Braley, and R. J. Scholze. 1994. Applying field-experiment bioreactors and landfarming in Alaskan climates. In: Hinchee, R. E., B. C. Alleman, R. E. Hoeppe, R. N. Miller. (Eds.), *Hydrocarbon bioremediation*. Lewis Publishers, Boca Raton, pp. 100-106.
 35. Tyler, G., and T. Olsson. 2001. Concentrations of 60 elements in the soil solution as related to the soil acidity. *Eur. J. Soil Sci.* 52: 151-165.
 36. Van Hees, P. A. W., K. Elgh-Dalgren, M. Engwall, and T. von Kronhelm. 2008. Re-cycling of remediated soil in Sweden: An environmental advantage? *Resour. Conserv. Recy.* 52: 1349-1361.
 37. Wingrov, T. 1997. Diesel contamination remediation at a remote site in a cold climate. *Pract. Period. Hazard. Toxic Radioact. Waste Manage.* 1(1): 30-34.
 38. Yang, J. W., and Y. J. Lee. 2007. Status of soil remediation and technology development in Korea. *Korean Chem. Eng. Res.* 45(4): 311-318.
 39. Yeboah, E., P. Ofori, G. W. Quansah, E. Dugan, and S. P. Sohi. 2009. Improving soil productivity through biochar amendments to soils. *African J. Environ. Sci. Technol.* 3: 34-41.
 40. Yun, H. B., S. G. Han, J. S. Lee, Y. J. Lee, M. S. Kim, and Y. B. Lee. 2010. Pig manure compost and urea application effects on Chinese cabbage in different soil fertility. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43(6): 962-967.
 41. Yun, H. B., W. K. Park, S. M. Lee, S. C. Kim, and Y. B. Lee. 2009. Nitrogen uptake by Chinese cabbage and soil chemical properties as affected by successive application of chicken manure compost. *Korean J. Environ. Agric.* 28(1): 9-14.