

Research Article



CrossMark

Open Access

석탄회를 이용한 염류집적 토양 개선과 작물 생육 증진

이종철^{1†}, 오세진^{2†}, 강민우¹, 김영현¹, 김동진³, 이상수^{*}

¹연세대학교 환경에너지공학과, ²(재)스마트팜연구개발사업단, ³강원대학교 환경연구소

Improvement of Salt Accumulated Soil and Crop Growth using Coal Ash

Jong Cheol Lee^{1†}, Se Jin Oh^{2†}, Min Woo Kang¹, Young Hyun Kim¹, Dong Jin Kim³ and Sang Soo Lee^{*} (¹Department of Environmental & Energy Engineering, Yonsei University, Wonju 26493, Korea, ²Korea Smart Farm R&D Foundation, Sejong 30121, Korea, ³Environmental Research Institute, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea)

Received: 10 May 2021/ Revised: 24 May 2021/ Accepted: 27 May 2021

Copyright © 2021 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.

ORCID

Jong Cheol Lee
<https://orcid.org/0000-0002-0417-2155>

Se Jin Oh
<https://orcid.org/0000-0002-7953-6216>

Min Woo Kang
<https://orcid.org/0000-0003-1638-9367>

Young Hyun Kim
<https://orcid.org/0000-0002-7730-9626>

Dong Jin Kim
<https://orcid.org/0000-0002-7784-4928>

Sang Soo Lee
<https://orcid.org/0000-0001-7096-898X>

Abstract

BACKGROUND: Cultivation area using agricultural plastic film facilities in Korea is rapidly increasing every year; however, it accelerates the salt accumulation in soils due to repeated cultivation and excessive use of chemical fertilizers. Coal ash contains various trace elements and has high potential to be used in agricultural purposes. This research was aimed to improve the quality of salts-accumulated soils and crop growth grown in the plastic film facilities using the soil amendment derived from coal ash and zero-valent iron powder.

METHODS AND RESULTS: Soil amendment used in the study was manufactured using coal ash with iron powder and subjected to a typical upland soil for soil quality enhancement and two salts-accumulated soils for crop

growth. After one month incubation of the salts-accumulated soils treated with the soil amendment, soil pH increased significantly and soil EC decreased by approximately 50%, compared to the control or the treatment without the soil amendment. Since the soil salts' concentration is proportional to EC, the subjected soil amendment can be proposed as an effective way to overcome soil salts accumulation in agricultural plastic film facilities. For crop growth, the length of roots and stems increased by approximately 10% and the dry weight also increased by a maximum of 75%, compared to the control.

CONCLUSION: The soil amendment made from waste resources such as coal ash and zero-valent iron was found to not only be effective in improving salt-accumulated soils and crop yield but also be safe against harmful heavy metals.

Key words: Crop growth, Coal ash, Soil salinity, Soil amendment, Zerovalent iron

[†]These authors contributed equally to this work.

*Corresponding author: Sang Soo Lee

Phone: +82-33-760-2457; Fax: +82-033-760-2571;

E-mail: cons@yonsei.ac.kr

서론

산업화 이후 인구 증가에 따른 식량의 부족과 수급의 불균형에 따라 지속적인 작물의 생산은 매우 중요하다[1]. 국내의 경우 높은 국토 이용률과 협소한 농경 면적과 더불어 문순 기후의 영향으로 기존 농경 방법을 통해 농업 생산성을 향상시키는 것은 매우 어려운 실정이다[2]. 또한, 높은 생활 수준으로 인해 보다 높은 품질의 농산물에 대한 요구가 높아짐에 따라 매년 시설하우스의 재배 면적이 증가하고 있다[2,3].

시설재배의 경우 폐쇄적 특성으로 인해 휴작기 없이 다모작이 가능하지만 시설 내에서 용탈되는 물과 염류(salts)의 양이 적어 토양에 염류가 집적되기 쉽다[4]. 토양의 과도한 염류 집적은 유용 미생물의 활성을 저해하고 근권의 삼투포텐셜(osmotic potential)이 낮아지게 되어 작물의 수분 이용이 어려워진다[5]. 또한, 토양 내 특정 염 성분이 다량 존재할 경우 토양의 통기성 및 투수성이 불량하게 되거나 작물에 독성을 일으켜 양분 불균형 및 생육이 불량하게 된다[6,7]. 이러한 염류 집적은 작물의 생육을 저해시켜 직접적인 생산성의 감소로 이어지지만, 토양 개량 및 생산량 증대를 위해 과도한 시비가 계속되고 있어 시설재배지의 염류 집적이 가속화되고 있다[12].

염류는 산(acid)의 음이온과 염기(alkali)의 양이온이 정전기적 인력(electrostatic attraction)으로 결합한 이온성 물질들의 화합물로, 물에 대한 용해성이 매우 높다[9]. 특히 다양한 염류 중 인산은 토양에 가장 빠르게 축적되는 영양소로, 지속적인 화학비료 시비에 의해 축적된다[11]. 염류 집적은 토양에 공급된 인산비료가 토양 중 존재하는 Al^{3+} , Ca^{2+} , Fe^{3+} 등의 양이온과 결합되어 불용성 인산염 형태로 토양에 축적된다[10]. 국내 시설하우스 토양은 염류(Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} 등)의 집적으로 인해 전기전도도(electrical conductivity, EC)가 농작물 생육 장애 기준인 2.0 dS/m보다 높다고 보고된 바 있다[8,9].

토양의 염류 집적을 완화하기 위해 객토, 심토반전, 표토 제거, 암거배수, 관수제염, 흡비 작물 재배, 미생물제제 처리 등이 있다[2,9,12]. 하지만 객토법과 심토반전법은 일시적인 염류 농도의 저감에 효율적이며, 표토 제거법은 유효 토심 감소의 문제가 있다. 암거배수법의 경우 설치비용이 높고, 관수제염법은 물의 소모가 많아 비경제적인 것으로 알려져 있다. 또한, 흡비작물 재배법은 농가의 소득 감소와 직결되며, 미생물 제제 처리법은 현장 적용 효율성이 낮은 것으로 보고되고 있다[9,12]. 시설재배 토양의 염류 집적을 완화하기 위한 노력들이 지속되고 있지만 기존 방법들은 한계가 있어 이에 대한 대책이 시급히 요구되고 있다.

토양개량제를 처리하여 염류를 흡착(adsorption) 또는 고정화(immobilization)시키는 방법은 토양 내 염류를 안정화(aging)하여 농작물 장해를 경감시킬 수 있으며, 개량제에 흡착된 영양원소가 시간 경과에 따라 토양용액으로 방출되어 양분 균형에 도움이 된다고 보고된 바 있다[12]. 특히, 석탄회, 미강, 제올라이트 및 영가철 같은 물질을 토양 및 수질 내 오염물질 또는 염류 제거를 위해 투입하였을 때 농도 저감에

효율적인 것으로 보고하였다[12-16]. 영가철의 경우 환경에서 쉽게 산화하여 Fe^{2+} 또는 Fe^{3+} 형태로 바뀌고, 큰 비표면적과 높은 반응성으로 인해 인산과 침전 형태로 안정화되는 것으로 알려져 있으며[3,16], 철은 미량 영양소 중 하나로 산화환원비를 유지, 엽록소 합성, 생체 항상성 유지, 초기 생육 증진 등 중요한 역할을 한다[13,15,17,22]. 점토광물의 경우도 토양 개량에 많이 사용되고 있는데, 그중 벤토나이트(bentonite)는 스멕타이트(smectite)로 구성되어 있는 비금속 광석으로 넓은 비표면적과 흡착성, 점성, 팽윤성 및 이온 교환성 등의 성질을 갖고 있어 토양 오염 예방을 위해 널리 이용되고 있다[18].

석탄회(coal ash)는 다공성 물질로써 흡착제로 활용성이 크며 상당량의 다량/미량 영양원소를 포함하고 있어 토양개량제로 활용할 경우 토양 질 개선 및 농업 생산성 증진에 도움이 될 수 있다[13,15,22]. 국내 석탄회 발생량은 2019년 기준 약 850만톤에 이르며 총 발생량 중 비산재(fly ash)가 80%, 바닥재(bottom ash)가 20%를 차지하고 있다[19,20]. 비산재는 입자가 미세하고 포졸란(pozzolan) 특성을 지니고 있어 주로 시멘트 원료와 레미콘 혼화제 및 성토용 골재로 사용되고 있고, 바닥재의 경우 상토 원료로 사용하거나 단순매립으로 처리하고 있다. 유럽과 일본 등에서는 오래전부터 토양개량제나 비료 등으로 널리 이용되어 왔으며, 미국 등 선진국에서는 유용활용(beneficial use) 기준에 적합한 경우에 한해 재활용 방안을 마련하고 있다[21].

본 연구는 석탄회와 영가철 분말로 제조한 토양개량제를 이용하여 시설 재배지 토양의 염류 농도를 저감시키고 농작물의 생육 증진에 미치는 영향을 평가하였다.

재료 및 방법

토양개량제

토양개량제는 비산재와 영가철 분말(0.8-1.0 μm)을 사용하여 제조하였다. 비산재는 벤토나이트와 90:10(w/w, %)의 비율로 혼합기(PM tech, PT150U, Korea)를 이용하여 균일 혼합하였다. 혼합물에 30%(w/w)의 증류수를 넣어 반죽 형태로 조제하였고, 이를 제형기(PM tech, PT6015A, Korea)를 이용하여 구형(직경 5 mm 이하)으로 석탄회볼(fly ash ball, FAB)로 제형하고 건조(60°C, 2시간)하였다.

건조한 구형의 비산재 표면에 영가철 분말(microscale zerovalent iron, MZVI)을 코팅하여 개량제로 제조하였다. 시험에 사용한 영가철은 표면에 일부 산화가 진행되어 있어 0.05% $NaBH_4$ 용액에 넣어 환원시켰으며, 용액 중 영가철의 농도가 0.1% 및 1.0%(w/v)가 되도록 조제하여 사용하였다[23]. 조제한 영가철 용액은 석탄회볼에 살포하는 동시에 가온시켜 코팅하였다.

염류 집적 토양의 안정화

본 연구에서 제조된 토양개량제가 염류 집적 토양 내 인산 농도 변화에 미치는 영향을 평가하였다. 토양은 강원도 철원군에 소재한 시설재배지에서 다년간 파프리카와 토마

토를 연작하며 지속적인 화학비료 시비로 염류가 집적된 토양을 채취하여 사용하였다.

토양 내 집적된 염류의 안정화 시험은 채취한 토양에 제작한 개량제를 40 g/10a과 400 g/10a으로 혼합하여 반응 용기에 넣고 증류수 40%(w/w)와 포화반죽(saturated paste)하였다. 30일간 24℃ 배양기에서 반응 후 채취 및 풍건하여 2 mm 체거름 후 분석에 사용하였다.

토양의 화학적 특성은 국립농업과학원에서 제시한 토양화학분석법에 준하여 pH, EC, 유효인산 및 교환성 양이온 함량을 측정하였다(NIAST, 2010). 토양의 pH는 증류수를 1:5의 비율로 교반 후 1시간 정치한 뒤 pH meter를 이용하여 60초 이내에 측정하였고, EC는 1:5의 비율로 30분간 진탕(120 rpm)하고 Whatman No.2 여과지(8 µm)로 여과한 후 EC meter를 이용하여 측정하였다. 유효인산 함량은 Bray No.1 방법으로 추출하여 ammonium paramolybdate로 발색시킨 후 UV/Vis spectrophotometer (Shimadzu, UV240, Japan)로 비색 정량하였다. 교환성 양이온 함량은 1M ammonium acetate (pH 7.0)로 침출시켜 여과하였고, 여액을 ICP-OES (Thermo, iCAP 6000, USA)로 측정하였다.

비효시험

본 연구에서 제조한 개량제의 처리가 토양 및 작물 생육 환경에 미치는 영향을 평가하기 위해 재배시험을 수행하였다. 재배시험을 위한 토양은 강원도 춘천에서 채취한 밭토양을 사용하였고, 비효 평가를 위한 개량제 처리량은 염류 제거 시험과 동일하게 처리하였다.

재배시험을 위해 토양과 제조한 개량제를 혼합하여 와그너 포트(1/5000 a)에 충전하고, 7일간 포장용수량의 70% 수분을 처리하여 안정화 하였다. 안정화된 토양에 열무(*Raphanus sativus* L.) 유묘(파종 후 10일 경과)를 식재 후 30일 동안 생육시켰다. 각 처리구는 3반복으로 수행하였으며, 유리 온실 내에 난괴법(randomized block design)으로 와그너 포트를 배치하여 재배하였다.

처리구에 식재한 열무 수확 시에 재배토양을 함께 채취하였다. 수확한 열무는 줄기 및 뿌리의 길이와 무게를 측정하였고, 체내 성분 함량을 분석하였다. 농작물 시료의 분석은 세척, 건조한 작물 시료를 분쇄하였고, 습식분해 후 다량(N, P, K 등) 및 미량(B, Fe, Mn 등) 영양원소 함량과 As, Cd, Pb 등

중금속 전함량을 분석하였다. 또한, 재배 토양의 경우도 화학적 특성 및 중금속 함량을 분석하였다.

토양의 화학적 특성 중 pH, 유효인산, 교환성 양이온은 국립농업과학원에서 제시한 토양 화학 분석법에 준하여 분석하였다(NIAST, 2010). 토양 내 유효 미량원소는 국립농업과학원에서 제시하는 DTPA-TEA 분석법(Diethylene triamine pentaacetic acid-Triethanol amine method)으로 침출시킨 유효 Fe, Mn, Zn, Cu 함량을 ICP-OES로 분석하였으며, 붕소함량은 토양에 증류수를 가하고 끓는 물에서 중탕하여 추출한 용액으로 측정하였다(NAAS, 2010).

통계분석

모든 시험은 3반복으로 수행하였으며, 개량제 처리에 따른 인산 제거와 개량 효율성 통계분석은 SPSS (ver. 22)를 이용하였다. 처리구 간 효율성 비교는 ANOVA 검정 후 Duncan's multiple range test ($p < 0.05$)로 유의성을 검정하였다.

결과 및 고찰

토양 특성

본 연구에서 사용한 염류집적 토양의 화학적 특성은 Table 1과 같다. 파프리카 재배 토양의 pH는 6.13으로 국내 시설재배 적정범위 수준을 보였으나, 토마토 재배 토양의 경우 pH 7.58로 적정범위를 초과하였다. EC는 파프리카와 토마토 재배 토양이 각각 7.25와 4.95 dS/m로 농작물 생육장해 기준인 2.0 dS/m를 초과한 수치를 나타냈다[9]. 채취 토양의 높은 EC는 염류 집적에 기인한 것으로 판단된다.

교환성 칼슘과 마그네슘의 농도는 파프리카 재배 토양에서 적정범위보다 각각 10배, 7배 높은 수준으로 나타났다. 토마토 재배 토양에서는 교환성 양이온 함량이 적정범위보다 약 10배 높았으며, 유효인산 함량은 2배 이상 높은 수준으로 나타났다. 이는 연작과 화학비료의 과도한 시비가 빈번하게 발생하는 시설재배의 특성에서 기인한 것으로 판단된다[8,9,11].

비효시험에 사용한 토양의 pH, 교환성 칼슘의 경우 국내 밭토양 적정범위에 속하였고, 유효인산 및 교환성 칼슘은 적정범위보다 낮은 수준을 보였다(Table 2). 또한 교환성 마그네슘 함량은 적정수준 이상을 함유하는 것으로 나타났다. 토양의 미량 영양원소 함량은 B, Fe, Mn, Zn이 각각 0.78, 13.5, 5.87, 2.34 mg/kg의 수준으로 나타났다.

Table 1. Chemical properties of two different salt-accumulated soils cultivated with paprika and tomato

Soils	pH (1:5)	EC (dS/m)	Avail. P ₂ O ₅ (mg/kg)	Ex. cations (cmol/kg)		
				Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺
Optimum range	6.0-6.5	≤2.0	300-500	5.0-6.0	0.7-0.8	1.5-2.5
Paprika	6.13	7.25	180	65.2	0.94	18.2
Tomato	7.58	4.95	1,224	49.1	7.26	24.9

* Optimum growth range of greenhouse (NIAST, 2017).

Table 2. Chemical properties of upland soil for the cultivation experiment

pH (1:5)	Avail. P ₂ O ₅ (mg/kg)	B ³⁺ (mg/kg)	Fe ²⁺ (mg/kg)	Mn ²⁺ (mg/kg)	Zn ²⁺ (mg/kg)	Ex. cations (cmol/kg)		
						Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺
5.85	181	0.78	13.5	5.87	2.34	3.42	0.67	4.80

Table 3. Change of pH, EC, and salts in paprika and tomato cultivated soils subjected to soil amendment

Treatment	pH (1:5)	EC (dS/m)	Avail. P ₂ O ₅ (mg/kg)	Ex. cations (cmol/kg)			
				Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	
Paprika	Control	6.69±0.05a	6.78±0.25c	185±17.5b	64.2±2.95c	0.95±0.04c	17.2±0.59c
	40 g/10a	7.25±0.08b	6.28±0.03b	53.4±2.88a	56.1±3.24b	0.77±0.02b	13.0±1.00b
	400 g/10a	7.78±0.07c	3.68±0.15a	34.2±3.16a	42.1±2.95a	0.61±0.07a	8.31±1.32a
Tomato	Control	7.73±0.04a	4.77±0.20c	1193±18.5c	53.0±1.05c	7.07±0.09b	23.6±0.40c
	40 g/10a	8.00±0.08b	4.18±0.15b	331±55.5b	47.3±2.29b	5.98±0.47a	18.1±1.22b
	400 g/10a	8.18±0.15b	2.45±0.05a	131±28.7a	42.8±1.05a	5.88±0.18a	13.7±1.10a

† Different letter indicates significant differences at $p < 0.05$ level by Duncan test

개량제 투입에 따른 염류 저감

시설재배 토양에 개량제를 처리하고 30일간 방치한 토양의 pH 및 염류 농도는 Table 3과 같다. 개량제가 처리된 토양의 pH는 대조구에 비해 증가하였다. 일반적인 작물 생육 범위에는 포함되었지만[24], 파프리카(적정 pH 5.5-5.7)와 토마토(적정 pH 6.0-6.5) 재배 토양의 적정 pH 범위보다 다소 높게 나타났다(NIAS, 2017). 이는 개량제에 함유된 영가철과 석탄회의 특성이 기인한 것으로 판단된다. 영가철에 의한 pH 증가는 토양 내에서 철이온(Fe²⁺, Fe³⁺)으로 산화되며 생성되는 전자와 OH⁻기의 영향과[16,23] 석탄회에 존재하는 수용성 이온의 함량 대부분이 Ca(OH)₂로 포화되어 있는 특성에 따른 것으로 판단된다[13,15,25].

토양의 EC는 모든 처리구에서 유의하게 감소하였고, 대조구(6.78과 4.77 dS/m)와 비교하였을 때 개량제 처리량을 증가시키면 따라 10%(40 g/10a)에서 50%(400 g/10a) EC가 감소하여 안정화 효율이 증가하는 것으로 나타났다. EC와 염류 농도는 정비례 관계에 있기 때문에 본 연구에서 제조한 개량제는 염류 경감에 효율적이라고 판단된다[26]. 개량제의 처리로 작물생육 장애 농도(2.0 dS/m)를 만족시키지는 못했지만, 정상토양(pH<8.5, EC<4.0 dS/m)의 범위는 만족하여 염류에 민감한 농작물을 제외하면 생육에 지장이 없는 수준으로 나타났다[26].

토양 내 염류 중 화학비료에 대한 의존도가 높은 인산, 칼슘, 칼륨 및 마그네슘의 유효태 함량을 분석하였다. 토양 내 염류는 EC와 마찬가지로 개량제 처리에 따라 모든 원소가 대조구보다 유의하게 감소하였고, 처리량을 증가시키면 토양 내 염류 안정화 효율성이 향상되는 것으로 나타났다. 특히, 국내 시설하우스 염류집적 토양에서 가장 문제시되는 유효인산의 경우 적정범위(300-500 mg/kg)를 크게 초과하였던 토마토 재배

토양(대조구 1193 mg/kg)에서 개량제의 처리 후 331 mg/kg (40 g/10a)과 131 mg/kg(400 g/10a)으로 적정범위 내 또는 그 이하까지 크게 감소하는 것으로 측정되었다. 이는 개량제 처리에 의한 높은 공극률과 투수도, 흡착, 희석(dilution) 등에 의한 물리성 개선의 영향으로 판단된다[27,28].

개량제를 투입한 모든 토양의 교환성 양이온은 대조구 대비 유의하게 감소(파프리카 재배 토양 48-87%, 토마토 재배 토양 58-89%)하였지만 유효인산과 비교하여 효율이 높지 않은 것으로 나타났다. 이는 개량제 처리에 따라 토양 pH가 증가하며 양이온성의 원소의 이동성 감소에 따라 저감효율이 낮아졌기나[24], 석탄회에 포함된 수용성 양이온이 해리(dissociation)되며 나타난 결과로 판단된다[13,22].

개량제 처리에 따른 토양 EC와 염류 농도 간의 상관관계를 분석하였다(Table 4). 토양 EC와 염류 종류 또는 토양 염류 농도의 상관관계(r)는 0.672($p < 0.05$)~0.985($p < 0.01$)로 높은 정의 상관관계를 나타내었다. 이는 본 연구에서 사용된 토양개량제가 토양의 염류집적 경감에 효과적이라고 판단된다. 이는 염류집적 토양의 염 제거량과 EC가 유사하게 감소한다고 보고한 연구결과들과 일치하였다[8,24]. 또한, 염류집적 토양의 염류 함량보다 식물에 의해 흡수가 용이한 토양 용액 중 수용성 염류의 안정화가 더 중요한 인자로 보고하였고[12], 토양 내 유효태 염류 함량과 수용성 염류 함량은 높은 상관성이 있는 것으로 보고한 결과와 같이 토양 내 염류 안정화는 수용성 염류의 안정화에도 이점이 있을 것으로 판단된다[11].

비효 시험: 토양 특성 변화

본 실험에서는 작물을 수확한 후 개량제 처리에 따른 토양의 미량 및 다량 영양소 함량을 분석하였다(Table 5). 토양의 유효인산 함량은 개량제 처리에 의해 유의하게 증가하였는데,

Table 4. Correlation coefficient between EC and salt concentration in two salt-accumulated soils as affected by soil amendment

	EC	Avail. P ₂ O ₅	Ex. Ca ²⁺	Ex. K ⁺	Ex. Mg ²⁺	
Paprika	EC	1	0.709*	0.916**	0.864**	0.901**
	Av. P ₂ O ₅		1	0.793**	0.875**	0.859**
	Ex. Ca ²⁺			1	0.942**	0.985**
	Ex. K ⁺				1	0.951**
	Ex. Mg ²⁺					1
Tomato	EC	1	0.801**	0.872**	0.672*	0.912**
	Av. P ₂ O ₅		1	0.931**	0.895**	0.941**
	Ex. Ca ²⁺			1	0.757**	0.920**
	Ex. K ⁺				1	0.905**
	Ex. Mg ²⁺					1

†Probabilities for pearson correlation coefficients represent *, at $p<0.05$; **, at $p<0.01$

Table 5. Macro- and micro-nutrients in the upland soil treated with soil amendment

Treatment	Avail. P ₂ O ₅ (mg/kg)	B ³⁺ (mg/kg)	Fe ²⁺ (mg/kg)	Mn ²⁺ (mg/kg)	Ex. cations (cmol/kg)		
					Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺
Control	164±1.30a	0.73±0.23a	12.0±0.46b	4.96±0.20b	3.48±0.11a	0.70±0.06a	4.63±0.25a
40 g/10a	178±7.43b	0.86±0.16a	10.0±0.50a	4.23±0.24a	3.49±0.18a	0.70±0.05a	4.61±0.31a
400 g/10a	178±9.08b	0.82±0.03a	14.5±0.39c	5.15±0.11b	3.36±0.06a	0.68±0.03a	4.54±0.02a

†Different letter indicates significant differences at $p<0.05$ level by Duncan test

이는 석탄회(비산재)의 높은 표면적으로 인해 일반적인 유기물과 비교하여 양분의 흡착능이 큰 것으로 판단된다[29]. 이와 유사하게, 석탄회의 토양 처리가 식물이 유효태 인산 함량을 증가시킨다고 보고된 바 있다[22,30,31]. 높은 표면적의 흡착체는 오히려 유효인산의 농도를 감소시킬 수 있으나, 근권(rhizosphere) 미생물이 분비하는 인산가수분해효소(phosphatase)의 작용으로 인해 토양 내 불용성 인산이 가용화되어 유효인산 함량이 유의하게 증가한 것으로 판단된다[32]. 식물 유효태 철 함량의 경우 400 g/10a 처리 수준에서 대조구보다 증가하였고, 이는 개량제 표면에 코팅한 영가철의 영향으로 판단된다. 하지만, 40 g/10a 개량제를 처리한 시험구에서는 철 함량이 증가하지 않았으며, 이는 처리한 개량제에 함유된 적은 영가철 함량에 기인한 것으로 판단된다.

미량 영양소인 붕소와 망간의 토양 내 함량은 개량제 처리에 따라 대조구보다 증가하는 경향을 보였으나, 통계적으로 유의성이 없는 것으로 나타났다. 또한, 토양 내 교환성 양이온 함량의 경우도 개량제 처리로 농도가 증가하지 않는 것으로 나타났다. 이는 기존 석탄회 처리에 따른 토양 내 교환성 양이온 함량이 증가한다는 연구 결과와 상이하다. 개량제 투입 후 배양 기간이 다소 짧고 본 실험에서 사용된 석탄회의 성분에 기인된 결과로 판단된다[13,22].

토양 내 비소 함량은 대조구를 포함하는 모든 처리구에서 검출한계 미만으로 측정되었다. 카드뮴과 납의 경우 대조구

(각각 1.27 mg/kg과 11.2 mg/kg) 보다 소폭 증가하여 각각 1.38-1.51 mg/kg과 11.9-12.1 mg/kg의 범위로 나타났다. 토양 내 중금속 함량은 증가하였지만, 국내 토양환경보전법 상의 기준을 충족한 수준으로 향후 석탄회의 농업적 이용 가능성이 높을 것으로 판단된다.

비효 시험: 작물 생육 변화

개량제를 처리한 토양에 유묘를 이식하고 초기(이식 후 10일)와 수확 시(30일) 생육을 조사하였다. 각 처리구별 생육 결과는 Fig. 1과 같다. 수확 후 측정된 열무 뿌리와 줄기의 길이는 대조구(각각 13.8 cm/unit과 14.9 cm/unit)보다 처리구의 생육량이 약 10% 증가하였고, 뿌리 초기 생육은 대조구(3.40 cm/unit)보다 처리구 40 g/10a와 400 g/10a에서 각각 6.17 cm/unit과 6.63 cm/unit로 약 2배 증가한 것으로 나타났다. 뿌리는 토양과 직접 접하는 부위로 초기 생육 단계에서 개량제의 효과에 민감하게 반응하며 나타난 결과로 판단되며, 철은 미량 영양소의 하나로 농작물의 초기 생육 증진에 도움을 준다는 결과와 일치하였다[26,33]. 철에 의한 식물 독성 농도는 1000 mg/L 수준이며, 500 mg/L 이하의 농도가 식물의 생육에 적합하다는 기존 연구 결과와 일치하였다[26,34,35]. 기술하지는 않았지만 줄기의 SPAD 분석 결과 개량제 처리구에서 수확한 열무의 경우 33.2와 37.1로 대조구(30.1)보다 증가하였고, 개량제의 주성분인 영가철과 석탄회

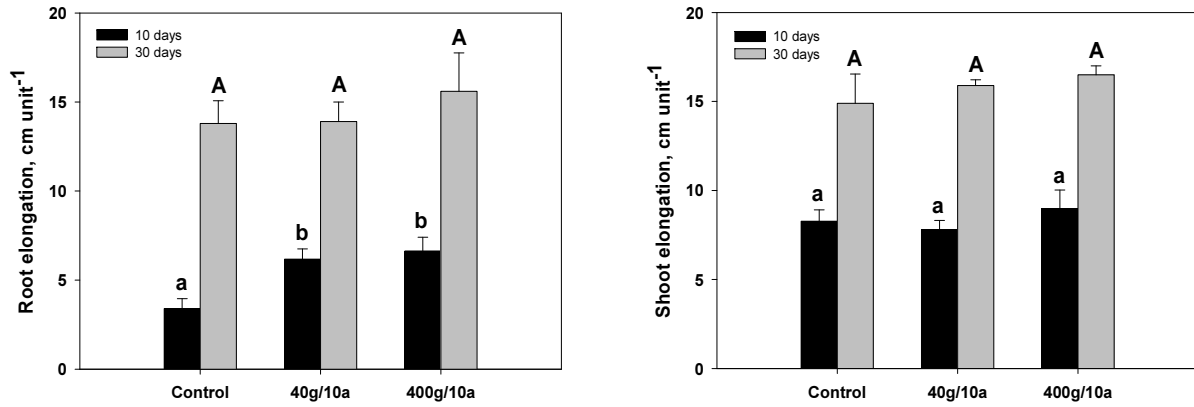


Fig. 1. Growth of radish (*Raphanus sativus* L.) root and shoot at 10 and 30 days after transplantation, as affected by soil amendment.

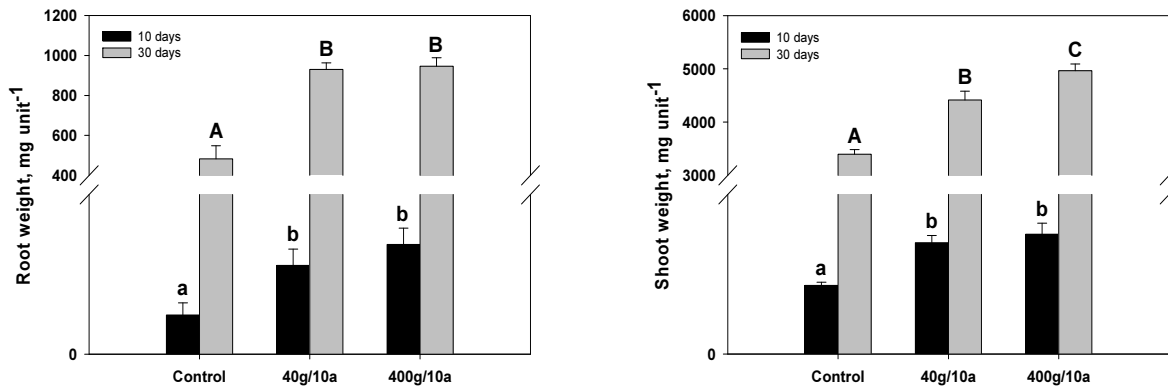


Fig. 2. Dry weight of radish (*Raphanus sativus* L.) root and shoot at 10 and 30 days after transplantation, as affected by soil amendment.

의 영향으로 엽록소 합성이 촉진된 결과로 판단된다[22,26].

처리구에서 수확한 열무의 건중량의 경우 대조구(줄기 3397 mg/unit, 뿌리 172 mg/unit)보다 유의하게 증가하여 4414-4964 mg/unit와 279-300 mg/unit으로 나타났다 (Fig. 2). 건중량은 개량제 처리구에서 정식 후 10일과 30일 모두 증가되었다. 50 mg/L의 영가철을 처리하였을 때 부들 (*Typha latifolia*)의 길이와 무게가 30% 정도 증가했으며, 석탄회를 처리하였을 때 벼의 생육량과 생산량이 증가했다는 기존 연구결과들과 일치하였다[22,35].

처리구에서 수확한 열무의 다량 영양소 함량은 Table 6과 같다. T-P와 Ca의 함량은 대조구보다 400 g/10a 처리한 실험구에서 유의하게 증가하였으며, K과 Mg 함량은 대조구와 유사하였다. 이는 석탄회의 처리에 따라 토양 내 식물 유효태 인산 등을 증가시켜 생육에 이점을 제공할 수 있다고 보고한 결과와 일치하였다[22,30,31].

식물 미량 영양소인 B, Fe, Mn의 함량은 대조구(각각 14.1, 181 및 102 mg/kg)보다 실험구에서 각각 15.1-18.9, 218-226 및 106-125 mg/kg으로 유의하게 증가하였고, 아연의 함량은 대조구와 비슷한 수준이었다. 석탄회의 경우 B,

Fe, Mn 등의 미량 영양소를 함유하고 있어 식물영양소 제공원으로 활용이 가능하다고 보고된 바 있으며[22,30], 영가철이 처리된 토양에서 생육한 식물 뿌리의 세포막에서 철이 검출된다고 보고한 결과와 일치하였다[35].

수확한 열무의 체내 중금속 함량 분석결과 비교와 납 함량은 400 g/10a 처리구에서 각각 0.10 mg/kg과 0.15 mg/kg으로, 대조구(각각 0.05 mg/kg와 0.13 mg/kg)보다 증가하였고, 카드뮴 함량은 대조구(0.03 mg/kg)와 비슷한 0.02 mg/kg 수준으로 나타났다. 개량제 처리구에서 수확한 열무의 비소와 납 함량은 다소 증가하였지만, 이는 국내 식품공전의 기준치 (Korea Food Standards Codex)를 만족하는 범위로, 향후 석탄회를 포함한 토양개량제의 농업 분야 활용이 가능할 것으로 판단된다.

요 약

본 연구는 폐자원 재활용 측면에서 농업적 유용활용(beneficial use)이 가능할 것으로 판단되는 영가철과 석탄회로 제조한 토양개량제를 투입하여 토양 염류 농도와 작물 생산

Table 6. Macro- and micro-nutrients in radish (*Raphanus sativus* L.) grown in a soil treated with soil amendment.

Treatment	TP (%)	Ca ²⁺ (%)	K ⁺ (%)	Mg ²⁺ (%)
Control	0.24±0.02a	1.41±0.02a	2.95±0.05b	0.40±0.01a
40 g/10a	0.26±0.03a	1.37±0.02a	2.64±0.07a	0.41±0.04a
400 g/10a	0.33±0.02b	1.59±0.03b	2.93±0.04b	0.40±0.04a
Treatment	B ³⁺ (mg/kg)	Fe ²⁺ (mg/kg)	Mn ²⁺ (mg/kg)	Zn ²⁺ (mg/kg)
Control	14.1±0.57a	181±4.51a	102±6.95a	66.9±1.01a
40 g/10a	15.1±0.21b	218±12.5b	125±9.00b	62.9±2.79a
400 g/10a	18.9±0.47c	226±10.4b	106±9.71a	64.4±2.17a

†Different letter indicates significant differences at $p < 0.05$ level by Duncan test

량에 미치는 영향을 배양시험과 재배시험으로 평가하였다. 토양개량제는 석탄회를 구형으로 체형하고 영가철이 함유된 용액(0.1, 1.0%)을 표면에 살포하여 제조하였다. 토양개량제는 밭토양으로 충전된 와그너포트에 40 g/10a과 400 g/10a를 처리하였고, 30일 간 배양한 후 토양 EC와 염 농도를 분석하였다. 토양의 EC는 400 g/10a 실험구에서 대조구 대비 약 50% 감소한 것으로 나타났다. 국내 대표적인 염류인 유효인산의 경우 개량제의 처리 후 1/3 수준으로 감소되었다. 개량제 처리에 따른 토양 내 EC와 염 농도의 감소는 매우 유의한 수준으로 분석되었다($r=0.672\sim0.985$). 또한 개량제 처리 후 뿌리와 줄기의 생육은 약 10% 증가였고, 건중량 또한 대조구에 비해 줄기와 뿌리에서 각각 30-50%와 60-75% 유의하게 증가하였다. 석탄회와 영가철을 농업용 토양개량제로 재활용할 경우 농업 환경 개선뿐만 아니라 농업 생산성 증대에도 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

Note

The authors declare no conflict of interest.

References

- Yang JE, Ok YS, Chung DY (2011) Future directions and perspectives on soil environmental researches. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 44, 1286-1294. <https://doi.org/10.7745/KJSSF.2011.44.6.1286>.
- Kim DH, Choi JH, Kim LY, Nam CM, Baek K (2012) Economic analysis on desalination technology for saline agricultural land on the basis of crop production. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 17, 40-48. <https://doi.org/10.7857/JSGE.2012.17.5.040>.
- Hyun BK, Jung SJ, Jung YJ, Lee JY, Lee JK, Jang BC, Choi ND (2011) Soil management techniques for high quality cucumber cultivation in plastic film greenhouse. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 44, 717-721. <https://doi.org/10.7745/KJSSF.2011.44.5.717>.
- Kim MK, Roh KA, Ko BG, Park SJ, Jung GB, Lee DB, Kim CS (2010) Evaluation of nutrient discharges from greenhouses with flooding soil surface at two different locations. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 43, 315-321.
- Lee CK, Seo KW, Lee GJ, Choi SU, Ahn BK, Ahn MS (2019) Nutrient uptake and growth of watermelons in DTPA-Treated saline soil in a plastic film greenhouse. *Horticultural Science and Technology*, 37, 32-14. <https://doi.org/10.12972/kjhst.20190004>.
- Lee JE, Yun SI (2014) Effects of compost and gypsum on soil water movement and retention of a reclaimed Tidal Land. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 47, 340-344. <https://doi.org/10.7745/KJSSF.2014.47.5.340>.
- Lee JE, Seo DH, Ro HM, Yun SI (2016) Yield Response of Chinese Cabbage to Compost, Gypsum, and Phosphate Treatments under the Saline-sodic Soil Conditions of Reclaimed Tidal Land. *Horticultural Science & Technology*, 34, 587-595. <https://doi.org/10.12972/kjhst.20160060>.
- Cho JM, Kim DH, Yang JS, Baek K (2011) Electrokinetic restoration of sulfate-accumulated saline greenhouse soil. *Clean Soil Air Water*, 39, 1036-1040. <https://doi.org/10.7857/JSGE.2011.16.5.018>.
- Oh SE, Son JS, Ok YS, Joo JH (2010) A modified methodology of salt removal through flooding and drainage in a plastic film house soil. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 43, 565-571.
- Park HS, Yeom YH, Yoon MH (2018) Comparison on phosphate solubilization ability of *Pantoea rodasil*

- and *Burkholderia stabilis* isolated from button mushroom media. *Journal of mushrooms*, 16, 31-38. <https://doi.org/10.14480/JM.2018.16.1.31>.
11. Jung YS, Cho SH, Yang JE, Kim JJ, Lim HS (2000) Available phosphorus and electrical conductivity of the saturated extracts of soils from the plastic film houses. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 33, 1-7.
 12. Ok YS, Yang JE, Yoo KY, Kim YB, Chung DY, Park YH (2005) Screening of adsorbent to reduce salt concentration in the plastic film house soil under continuous vegetable cultivation. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 24, 253-260. <https://doi.org/10.5338/KJEA.2005.24.3.253>.
 13. Gupta AK, Dwivedi S, Sinha S, Tripathi RD, Rai UN, Singh SN (2007) Metal accumulation and growth performance of *Phaseolus Vulgaris* grown in fly ash amended soil. *Bioresource Technol*, 98, 3404-3407. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.08.016>.
 14. Min JE, Park IS, Ko SO, Shin WS, Park JW (2008) Sorption of dissolved inorganic phosphorus to zero valent iron and black shale as reactive materials. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 30, 907-912.
 15. Rai UN, Pandey K, Sinha S, Singh A, Saxena R, Gupta DK (2004) Revegetating fly ash landfills with *Prosopis juliflora* L.: Impact of different amendments and *Rhizobium* inoculation. *Environment International*, 30, 293-300. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(03\)00179-X](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(03)00179-X).
 16. Wen Z, Zhang Y, Dai C (2014) Removal of phosphate from aqueous solution using nanoscale zero-valent iron. *Colloid Surface A*, 457, 433-440. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2014.06.017>.
 17. Hwang JY, Jun SE, Park NJ, Oh JS, Lee YJ, Sohn EJ, Kim GT (2017) Growth-promoting effect of new iron-chelating fertilizer on lettuce. *Journal of Life Science*, 27, 390-397. <https://doi.org/10.5352/JLS.2017.27.4.390>.
 18. Kim JG, Kim MN, Malsawmdawngzela Ralte, An CS, Lee SM (2019) Adsorption removal of cesium from aqueous solution using activated bentonite. *Korean Society of Water Science and Technology*, 27, 77-87. <http://dx.doi.org/10.17640/KSWST.2019.27.2.77>.
 19. Kim DS, Han GS, Lee DK (2019) Recycling of useful materials from fly ash of coal-fired power plant. *The Korean Society of Clean Technology*, 25, 179-188. <https://doi.org/10.7464/ksct.2019.25.3.179>.
 20. Kim JH, Joo JC, Kang EB, Choi JS, Lee JM, Kim YH (2018) Assessment of heavy metal leaching and ecological toxicity of reused coal bottom ash for construction site runoff control. *Journal of Korea Society of Waste Management*, 35, 561-570. <https://doi.org/10.9786/kswm.2018.35.6.561>.
 21. Cho HN, Maeng JH, Kim EY (2017) Studies on Expanding Application for the Recycling of Coal Ash in Domestic. *Journal of Environmental Impact Assessment*, 26, 563-573. <https://doi.org/10.14249/eia.2017.26.6.563>.
 22. Oh SJ, Yun HS, Oh SM, Kim SC, Kim RY, Seo YH, Lee KS, Ok YS, Yang JE (2013) Effect of fly ash fertilizer on paddy soil quality and rice growth. *Journal of Applied Biological Chemistry*, 56, 229-234. <https://doi.org/10.3839/jabc.2013.036>.
 23. Niyas Ahamed MI (2014) Ecotoxicity concert of nano zero-valent iron particles: A review. *Journal of Critical Reviews*, 1, 36-39.
 24. Cho SU, Kim DH, Yang JS, Chung KY, Baek KT (2012) Electrokinetic restoration of saline agricultural land. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 17, 19-26. <https://doi.org/10.7857/JSGE.2012.17.4.019>.
 25. Iyer R (2002) The surface chemistry of leaching coal fly ash. *Journal of Hazardous Materials*, 93, 321-329. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(02\)00049-3](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(02)00049-3).
 26. Brady NC, Weil RR (2010) *Elements of the natural and properties of soils*, 3rd edition, MacMillan, New York.
 27. Park JC, Chung DY, Han GH (2012) Effects of Bottom Ash Amendment on Soil Respiration and Microbial Biomass under Anaerobic Conditions. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 45, 260-265. <https://doi.org/10.7745/KJSSF.2012.45.2.260>.
 28. Kim YG, Lim WS, Hong CO, Kim PJ (2014) Effect of combined application of bottom ash and compost on heavy metal concentration and enzymeactivities in upland soil. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 33, 262-270. <https://doi.org/10.5338/KJEA.2014.33.4.262>.
 29. Liang B, Lehmann J, Solomon D, Kinyangi J, Grossman J, O'Neill B, Skjemstad JO, Thies J, Luizao FJ, Petersem J, Neves EG (2006) Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Science Society of America Journal*, 70, 1719-1730. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0383>.
 30. Pandey VC, Abhilash PC, Upadhyay RN, Tewari DD (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. *Journal of Hazardous Materials*, 166, 255-259.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.11.016>.
31. Thind HS, Singh Y, Singh B, Singh V, Sharma S, Vashistha M, Singh G (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 Crops Research*, 135, 137-144.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.07.012>.
32. Lee KK, Mok IK, Yoon MH, Kim HJ, Chung DY (2012) Mechanisms of Phosphate Solubilization by PSB (Phosphate-solubilizing Bacteria) in Soil. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 45, 169-176.
33. Kim MS, Koo N, Kim JG, Yang JE, Lee JS, Baek GI (2012) Effects of soil amendments on the early growth and heavy metal accumulation of *Brassica campestris* ssp. *Chinensis* Juls. in heavy metal-contaminated soil. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 45, 961-967.
<https://doi.org/10.7745/KJSSF.2012.45.6.961>.
34. Kim JH, Lee Y, Kim EJ, Gu S, Shon EJ, Seo YS, An HJ, Chang YS (2014) Posure of iron nanoparticles to *Arabidopsis thaliana* Enhances root elongation by triggering cell wall loosening. *Environmental Science & Technology*, 48, 3477-3485.
<https://doi.org/10.1021/es4043462>.
35. Ma X, Gurung A, Deng Y (2013) Phytotoxicity and uptake of nanoscale zero-valent iron (nZVI) by two plant species. *Sci. Science of The Total Environment*, 443, 844-849.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.11.073>.