

FOOD&CHEMISTRY

Effects of organic amendments on lettuce (*Lactuca sativa* L.) growth and soil chemical properties in acidic and non-acidic soils

Yun-Gu Kang¹, Jun-Yeong Lee¹, Jun-Ho Kim¹, Taek-Keun Oh^{1*}, Yeo-Uk Yun^{1,2*}

¹Department of Bio-Environmental Chemistry, College of Agriculture and Life Science, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

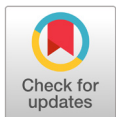
²Division of Environmentally Friendly Agriculture, Chungnam Agricultural Research and Extension Services, Yesan 32418, Korea

*Corresponding authors: ok5382@cnu.ac.kr, aoggj61@korea.kr

Abstract

Soil acidification challenges global food security by adversely influences soil fertility and agricultural productivity. Carbonized agricultural residues present a sustainable and eco-friendly way to recycle agricultural waste and mitigate soil acidification. We evaluated the effects of organic amendments on lettuce growth and soil chemical properties in two soils with different pH levels. Carbonized rice husk was produced at 600°C for 30 min and rice husk was treated at 1% (w·w⁻¹). Carbonized rice husk increased soil pH, electrical conductivity, total carbon content, and nitrogen content compared with untreated and rice husk treatments. Furthermore, this study found that lettuce growth positively correlated with soil pH, with increasing soil pH up to pH 6.34 resulting in improved lettuce growth parameters. Statistical correlation analysis also supported the relationship between soil pH and lettuce growth parameters. The study findings showed that the use of carbonized rice husk increased the constituent elements of lettuce, such as carbon, nitrogen, and phosphate content. The potassium content of lettuce followed a similar trend; however, was higher in acidic soil than that in non-acidic soil. Therefore, improving the pH of acidic soil is essential to enhance agricultural productivity. It is considered advantageous to use agricultural residues following pyrolysis to improve soil pH and agricultural productivity.

Keywords: carbonized agricultural residue, nutrient contents, rice husk, soil pH



OPEN ACCESS

Citation: Kang YG, Lee JY, Kim JH, Yun YU, Oh TK. Effects of organic amendments on lettuce (*Lactuca sativa* L.) growth and soil chemical properties in acidic and non-acidic soils. Korean Journal of Agricultural Science 50:713-721. <https://doi.org/10.7744/kjoas.500410>

Received: June 20, 2023

Revised: September 24, 2023

Accepted: October 20, 2023

Copyright: © 2023 Korean Journal of Agricultural Science



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Introduction

토양의 산성화(soil acidification)는 토양의 비옥도와 농업생산성에 부정적 영향을 미치는 요인으로 식량 안보 측면에서 우선적으로 해결해야하는 주요 과제이다(Meena et al., 2019). 앞선 선행연구에서는 약 45억 ha의 토양에서 산성화가 진행되었으며, 이는 전세계 총 토지 면적의 30% 수준이라고 보고하였다(Meena et al., 2019). 또한, 농업부문에서 전체 농경지 면적의 약 50%에 해당하는 8.92억 ha의 토양에서 산성화가 진행되고 있다고 보고된 바 있다(Shetty

and Prakash, 2020). 인도 내 농경지 토양의 산성화 정도를 조사한 선행연구에서는 농경지 토양 중 약 30%는 자연적 요인(높은 강수량, 증발산량 등)으로 인해 산성화가 심화되어 농업 생산성이 감소한다고 보고하였다(Meena et al., 2019). 토양의 pH와 작물의 양분 이용 효율의 상관관계를 분석한 선행연구에서는 토양 pH가 감소함에 따라 작물의 질소(N)와 인산(P₂O₅) 이용 효율이 감소한다고 보고하였다(Cai et al., 2018). 이러한 토양의 산성화는 다양한 원인에 의해 유도되며, 대표적으로 산성 강하물에 의한 산성화, 무기질비료의 오남용, 토양 내 유기물 함량 부족 등으로 인해 발생하는 것으로 알려져 있다(Goulding, 2016). 이러한 토양 산성화 개선을 위해 많은 선행연구에서 다양한 산업부산물(레드머드, 보크사이트 부산물, 부산석고, 바이오차 등)을 활용하고 있다(Kim et al., 2018; Shin et al., 2019; Kang et al., 2021; Kim et al., 2021; Chun et al., 2022).

국내에서 발생하는 농업잔재물은 연간 약 1,164만 톤으로 알려져 있으며, 농업잔재물은 높은 수분함량으로 인해 재활용 방안(퇴비화)이 상당히 제한적이다(Kang et al., 2021). 이러한 상황에서 농업잔재물을 열 분해하여 제조할 수 있는 농업잔재탄화물은 폐자원을 친환경적으로 재활용할 수 있으며, 탄소 함량이 높아 농경지에 처리 시 유기물 함량을 증가시킬 수 있다(Shetty and Prakash, 2020; Chun et al., 2022; Kang et al., 2022). 농업부문에서 주로 배출되는 식물성 원료를 열 분해하여 제조한 농업잔재탄화물의 pH는 대부분 강한 알칼리성을 나타내며, 농업잔재탄화물의 pH는 원료의 종류 및 특성에 따라 달라진다(Kang et al., 2022). 옥수수 대의 pH 변화를 조사한 선행연구에서는 열 분해 온도를 300°C에서 700°C로 증가시키는 경우 농업잔재탄화물의 pH는 pH 7.57에서 pH 10.83으로 증가한다고 보고하였다(Kang et al., 2021). 또 다른 선행연구에서는 작물 재배 시 농업잔재탄화물 처리는 작물의 생산성을 향상시킬 수 있다고 보고하였으며, 배추재배지에 토양 중량 대비 1% (w·w⁻¹)를 처리하면 배추의 생육은 약 10% 향상된다고 보고하였다(Chun et al., 2022).

따라서, 본 연구는 임의로 pH를 조정된 토양 조건에서 상추 재배 시 농업잔재탄화물과 같은 유기개량제 처리가 작물의 생육 특성 및 토양의 화학적 특성에 미치는 영향을 평가하였다.

Materials and Methods

Soil and organic amendments

시험 토양은 충남대학교 농업생명과학대학 내 시험 밭 포장(35°14'12.8" N, 139°7'0.5" E)에서 채취하여 실외에서 2주간 충분히 건조시킨 후 2 mm 이하로 체거름하였으며, 산성화 토양의 경우 0.1 M hydrochloric acid (HCl)로 토양 pH를 조절한 후 사용하였다. 토양은 pH에 따라 산성화된 토양과 산성화되지 않은 토양으로 구분하였으며, 실험 전 토양의 화학적 특성을 분석한 결과는 Table 1에 나타내었다.

토양 pH 개선을 위한 탄화 왕겨는 2021년 충남대학교 농업생명과학대학 내 논 포장(36°22'05.0" N, 127°21'15.2" E)에서 발생한 왕겨를 수집한 후 600°C에서 30분간 회화로(1100°C Box Furnace, Thermo Fisher Scientific Inc., USA)에서 열 분해하여 제조하였다. 실험에 사용한 유기개량제는 분쇄하여 실험에 이용하였으며, 왕겨 원물과 탄화 왕겨의 화학적 특성을 분석한 결과는 Table 2에 나타내었다.

Table 1. Chemical properties of soil used in this experiment.

Soil	pH (1 : 5, H ₂ O)	EC (dS·m ⁻¹)	T-C	T-N (%)	OM	Avail. N (mg·kg ⁻¹)	Avail. P (mg·kg ⁻¹)	Exchangeable cations			
								Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺
Acidic	4.91 ± 0.05	0.25 ± 0.03	0.15 ± 0.02	0.02 ± 0.00	0.26 ± 0.03	43.16 ± 1.12	45.61 ± 2.02	8.42 ± 0.09	0.21 ± 0.00	3.82 ± 0.06	0.24 ± 0.00
Non-acidic	5.42 ± 0.05	0.35 ± 0.02	0.15 ± 0.01	0.02 ± 0.01	0.26 ± 0.02	44.87 ± 3.56	42.89 ± 1.62	8.40 ± 0.05	0.20 ± 0.01	3.79 ± 0.01	0.25 ± 0.02

EC, electrical conductivity; T-C, total carbon; T-N, total nitrogen; OM, organic matter; Avail. N, available nitrogen; Avail. P, available phosphate.

Table 2. Chemical properties of organic amendments used in this experiment.

Amendments	pH (1 : 5, H ₂ O)	EC (dS·m ⁻¹)	SA (m ² ·g ⁻¹)	T-C	T-N	T-H	T-P ₂ O ₅	H : C ratio
				(%)				
Carbonized rice husk	11.00 ± 0.01	6.59 ± 0.13	5.30 ± 0.00	54.90 ± 0.20	0.60 ± 0.01	4.87 ± 0.01	0.21 ± 0.00	1.06
Rice husk	6.10 ± 0.00	11.49 ± 1.62	2.55 ± 0.01	41.30 ± 0.01	0.40 ± 0.02	1.48 ± 0.09	0.14 ± 0.03	0.43

EC, electrical conductivity; SA, surface area; T-C, total carbon; T-N, total nitrogen; T-H, total hydrogen; T-P₂O₅, total phosphorus.

Growth experiments

작물 생육 평가는 충남대학교 농업생명과학대학 부속 유리온실에서 2022년 10월 14일부터 12월 2일까지 총 49일간 상추(*Lactuca sativa* L.)를 이용하여 수행하였으며, 1·5,000 a⁻¹ 크기의 pot를 이용하였다. 탄화시킨 농업잔재물이 작물 및 토양 특성에 미치는 영향을 평가하기 위해 원물 처리구를 포함한 토양 pH별로 비료 단독 처리구(control, inorganic fertilizers treatment), 무기질비료와 왕겨 혼합 처리구(RH, rice husk and inorganic fertilizers treatment), 무기질비료와 탄화 왕겨 혼합 처리구(carbonized rice husk and inorganic fertilizers treatment, CR)의 총 6개의 처리구를 3반복하였다. 왕겨 원물과 탄화 왕겨는 각 처리구 포트에 토양 중량 대비 1% (w·w⁻¹)을 처리하였으며, 무기질비료(N-P₂O₅-K₂O)는 농촌진흥청에서 제시한 상추의 시비처방기준에 준하여 200-59-128 kg·ha⁻¹를 처리하였다(RDA, 2022). 또한, 무기질비료는 생육 장애를 방지하기 위해 생육 기간 중 총 3회(작물 정식 후 1일, 16일, 그리고 31일)에 걸쳐 동일한 양을 분시하였다.

Analysis of soil and organic amendments

토양의 pH와 electrical conductivity (EC)는 토양과 증류수를 1 : 5 (w·v⁻¹) 비율로 혼합한 후 30분간 진탕하여 상층액을 Benchtop Meter with pH and EC (ORION™ Versa Star Pro™, Thermo Fisher Scientific Inc., USA)로 측정하였다. 토양의 total carbon (T-C)와 total nitrogen (T-N) 함량은 오븐에서 수분을 제거한 토양을 elemental analyzer (TruSpec Micro, Leco Corporation, USA)로 분석하였다. 또한, 본 연구에서는 토양 T-C 분석 결과를 이용하여 OM (organic matter) 함량을 계산하였다. 토양 내 available nitrogen (Avail. N) 함량은 2 M KCl로 토양을 침출한 후 UV/Vis-spectrophotometer (GENESYS 50 UV-Visible spectrometer, Thermo Fisher Scientific Inc., USA)로 분석한 NH₄⁺ 함량과 NO₃⁻ 함량을 합하여 계산하였다. Available phosphate (Avail. P) 함량은 UV/Vis-spectrophotometer와 Lancaster법을 이용하여 분석하였다. Exchangeable cations (Ca²⁺, K⁺, Mg²⁺, Na⁺)은 1 M NH₄OA_c로 토양을 침출한 후 ICP-OES (inductively coupled plasma-optical emission spectrometer, ICAP 7000 series ICP spectrometer, Thermo Fisher Scientific Inc., USA)로 분석하였다.

왕겨 원물과 탄화 왕겨의 pH와 EC는 1 : 10 (w·v⁻¹) 비율로 혼합한 용액의 상층부를 benchtop meter with pH and EC로 측정하였다. 유기개량제의 surface area (SA)는 surface area analyzer (ASAP 2420, Micromeritics Instrument Corporation, USA)를 이용하여 분석하였으며, 질소(N₂) 가스의 흡착 곡선을 이용하여 각각의 비표면적을 계산하였다. 유기개량제의 T-C와 T-N, total hydrogen (T-H) 함량은 elemental analyzer로 분석하였으며, total phosphate (T-P₂O₅) 함량은 ICP-OES를 이용하여 분석하였다.

Investigation of lettuce growth

왕겨 원물 및 탄화 왕겨 처리에 따라 변화한 토양 pH가 작물 생육에 미치는 영향을 평가하기 위해 49일째에 작물을 수확하여 생육 조사를 실시하였다. 작물의 생체중은 실험적 오차를 최소화하기 위해 수확 직후 측정하였으며, 생체중을 측정한 시료는 잎을 분리하여 엽장, 엽폭, 엽수를 측정하였다. 이때, 엽장과 엽폭의 경우 상위 3개체를 기준으로 측정하였으며, 엽수는 1 cm 이상의 엽을 모두 포함하여 계산하였다. 현장에서 생육 조사를 마친 시료

는 85°C로 설정한 dry oven (OF-12, Jeio Tech Co., Ltd., Korea)을 이용하여 48시간동안 건조 후, 건조 전과 후 무게를 이용하여 작물의 수분함량을 계산하였다. 엽록소 함량의 경우 생체중을 계산하기 전에 측정하였으며, MINOLTA chlorophyll meter (SPAD-502, Konica Minolta Inc., Japan)을 이용하여 상위 3개체를 측정하였다. 생육 조사를 끝낸 시료는 dry oven에서 건조 후, 분쇄하여 elemental analyzer와 ICP-OES로 구성 원소(C, N, P₂O₅, K₂O)를 분석하였다.

Statistical analysis

본 연구에서 제시한 결과는 모두 3반복 수행한 값을 Microsoft의 Excel 2016 (Microsoft Corporation, USA)을 이용하여 평균과 표준편차(standard deviation, SD)를 계산하여 나타내었다. 처리구 사이의 통계적 유의차는 SPSS (version 26, IBM, USA)를 이용하여 일원배치분산분석(one way analysis of variance, ANOVA)과 던컨의 다중 검정 (Duncan's multiple range test)을 수행하였다. 또한, 토양 pH와 생육 조사 항목간의 상관관계는 Pearson method를 이용하여 Python (version 3.10.4, Python Software Foundation, USA)으로 변수간 사이의 상관관계를 확인하였다.

Results and Discussion

Changes in the chemical characteristics of soil

작물 재배 후 토양의 화학적 특성을 분석한 결과는 Table 3에 나타내었다. 작물 재배 후 토양의 pH는 모두 증가하는 경향을 나타내었으며, CR에서 각각 pH 6.17과 pH 6.34로 가장 높게 증가하였다. 이는 RH (pH 6.10)에 비해 CR (pH 11.0)가 상대적으로 pH가 높아 토양 pH를 높게 상승시킨 것으로 사료되며, 이와 유사한 결과는 많은 선행 연구에서 보고된 바 있다(Lee et al., 2019; Chun et al., 2022; Kang et al., 2022). 토양 electrical conductivity (EC)는 작물 수확량에 영향을 미치는 요인 중 하나이며, RH를 처리하였을 때 각각 0.50 dS·m⁻¹ (acidic soil)와 0.40 dS·m⁻¹ (non-acidic soil)로 가장 높게 증가하였다. 이전 선행연구에서는 토양에 유기개량제 처리 시 유기개량제 내 수용성 양이온(Ca²⁺, K⁺ 등)의 방출로 인해 토양 EC가 증가한다고 보고하였으며, 또다른 선행연구에서는 분해가 용이한 유기개량제 처리는 토양 미생물의 활성을 증가시켜 유기개량제의 분해를 촉진시킨다고 보고하였다(Song et al., 2018; Singh et al., 2022). 이에 따라 본 연구에서도 RH와 CR 처리 시 토양 EC는 증가하였으며, 낮은 H : C ratio를 가지는 RH (0.43)에서 더 높게 증가하였다. 또한, 유기개량제의 EC를 비교하였을 때에도 RH (11.49 dS·m⁻¹)이 CR (6.59 dS·m⁻¹)에 비해 높은 EC를 가지고 있어 토양 EC 증가에 기여했을 것으로 생각된다.

Table 3. Chemical properties of soil treated with organic amendments.

Treatments	pH (1:5, H ₂ O)	EC (dS·m ⁻¹)	T-C	T-N	OM	Avail. N	Avail. P	Exchangeable cations				
								Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	
			(%)			(mg·kg ⁻¹)		(cmol _c ·kg ⁻¹)				
Acidic	Control	5.01±0.04c	0.23±0.02c	0.16±0.00c	0.04±0.01b	0.28±0.00c	34.57±2.05c	50.77±0.50a	7.41±0.09b	0.15±0.01a	2.59±0.10c	0.19±0.00a
	RH	5.29±0.03b	0.50±0.01a	0.24±0.01b	0.04±0.01b	0.41±0.01b	46.52±3.53b	48.01±0.78a	7.84±0.19a	0.15±0.01a	2.82±0.03b	0.15±0.00a
	CR	6.17±0.04a	0.44±0.01b	0.42±0.01a	0.10±0.03a	0.73±0.03a	67.88±1.68a	47.75±0.86a	8.16±0.08a	0.20±0.00a	3.12±0.06a	0.16±0.02a
Non-acidic	Control	5.50±0.03c	0.25±0.00b	0.16±0.00c	0.05±0.01b	0.27±0.00c	34.80±1.88c	46.76±1.50a	7.27±0.16bc	0.18±0.02a	2.59±0.40b	0.17±0.02a
	RH	5.71±0.04b	0.40±0.01a	0.21±0.01b	0.05±0.01b	0.36±0.02b	50.07±2.99b	46.62±4.71a	7.51±0.14b	0.14±0.01a	2.67±0.27b	0.15±0.03a
	CR	6.34±0.04a	0.39±0.02a	0.40±0.01a	0.10±0.01a	0.69±0.03a	70.87±0.74a	43.44±0.03b	7.87±0.09a	0.19±0.04a	3.06±0.07a	0.13±0.00a
p-value		***	**	**	*	**	**	***	**	*	**	***

RH, rice husk; CR, carbonized rice husk; EC, electrical conductivity; T-C, total carbon; T-N, total nitrogen; OM, organic matter; Avail. N, available nitrogen; Avail. P, available phosphorus.

*, **, and *** are used to indicate statistically significant differences at the p < 0.05, p < 0.01, and p < 0.001, respectively.

a - c: Each value with different letters within a column are significantly different from each other as determined by Duncan's multiple range test (p < 0.05).

토양 내 T-C 함량의 경우 CR 처리 시 각각 0.42% (acidic soil)와 0.40% (non-acidic soil)로 control과 RH에 비해 높게 증가하였으며, 이는 CR (54.90%)의 높은 T-C 함량에 기인한 것으로 판단된다. 또한, 토양의 OM 함량은 T-C 함량 분석 결과를 기초로 계산하였기에 토양 내 T-C 함량과 유사한 경향을 나타내었다. 토양 내 T-N 함량의 경우 토양에 RH 처리 시 control과 유사하였으나 CR에 비해서는 2배 이상 증가하였다. RH 처리에 따른 토양 내 T-C와 T-N 함량 증가는 많은 선행연구에서 보고되었으며, 농업잔재탄화물 처리 시 토양 T-C 함량은 최소 16%에서 최대 670%까지 증가하는 것으로 보고되었다(Lee et al., 2019; Chun et al., 2022; Kang et al., 2022).

토양 내 Avail. N 함량은 작물 재배 후 control에서는 소폭 감소한 반면 CR 처리 시 약 60%가량 증가하였다. 하지만, Avail. P 함량의 경우 control에서 가장 높게 증가하였으며, RH와 CR 처리 시 control에 비해 소폭 감소하는 경향을 나타냈다. Dong 등(2020)은 농경지 토양에 요소와 유기개량제를 혼합하여 처리하는 경우 토양 내 Avail. N 함량을 증가하는 반면 Avail. P 함량은 감소한다고 보고하였다. 또한, 선행연구에서는 이러한 현상의 근거로 토양에 처리한 유기개량제가 암모늄태 질소(NH_4^+)를 흡착하여 천천히 하강하면서 토양에 축적되는 반면 뿌리의 P_2O_5 흡수율을 증진시켜 토양 내 Avail. P 함량을 감소시킨다고 보고하였다(Dong et al., 2020).

토양 내 치환성 Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} 의 경우 작물 재배 후 모두 감소하는 경향을 나타내었으며, control에서 가장 낮게 감소하였다. 반면, 치환성 Na^+ 함량은 CR에서 가장 낮게 조사되었다. 앞선 선행연구는 토양 내 치환성 양이온 함량이 각기 다른 7종류의 토양에서 유기개량제 처리가 토양 내 치환성 양이온 함량에 미치는 영향을 평가하였다(Hailegnaw et al., 2019). 이때, 토양 내 치환성 양이온 함량이 낮은 토양에서는 유기개량제 처리 시 치환성 양이온 함량이 증가하는 반면 치환성 양이온 함량이 높은 토양에서는 유기개량제 처리량이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 또다른 선행연구에서는 토양 내 치환성 양이온 함량은 토양 pH와 양의 상관관계를 나타낸다고 보고하였다(Ito and Katagiri, 2021). 본 연구에서도 CR 처리 시 토양 pH가 pH 6.0 이상으로 타 처리구에 비해 높게 증가하였으며, 이에 따라 치환성 양이온의 함량도 가장 높게 조사되었다.

Changes in the growth characteristics of lettuce

토양 pH를 달리 설정한 조건에서 재배한 작물의 생육을 조사한 결과는 Table 4에 나타내었다. 생체중은 RH에서 가장 높았으며, 산성화 토양에 RH 처리 시 87.14 g으로 가장 높게 측정되었다. 산성화 토양의 control과 CR은 각각 45.45 g과 79.07 g으로 RH에 비해 약 48, 10% 낮은 수치였다. 일반 토양에서의 작물 생체중은 각각 63.39 g (control), 84.72 g (RH), 83.85 g (CR)으로 RH에서 가장 높았으나 CR와 통계적으로 유의한 차이를 나타내지 않았다. 수분함량의 경우 생체중과 유사한 경향을 나타내었으며, 상추의 엽장과 엽폭도 RH에서 가장 높게 측정되었다. 하지만, RH와 CR 사이의 통계적 유의차는 확인되지 않았다. 상추의 엽수는 CR 처리 시 가장 높게 증가하였으며, 산성화 토양과 일반 토양에서 각각 $23.67 \text{ ea} \cdot \text{plant}^{-1}$ 와 $26.33 \text{ ea} \cdot \text{plant}^{-1}$ 으로 조사되었다. 엽록소 함량은 control에서 가장 낮게 측정되었으며, 처리구간 통계적 유의차는 나타나지 않았다. 이전의 선행연구에서는 왕겨 원물을 비료로 활용하기 위해 연구를 진행하였으며, 왕겨 원물은 높은 리그닌(lignin) 함량으로 인해 부숙 속도가 느리지만 토양 생물의 활동에 의해 가속화되며, 토양 내 질산태 질소(NO_3^-)의 함량을 증진시켜 작물 생육을 돕는다고 보고하였다(Kumar et al., 2013). 하지만, 농업잔재물을 원물 형태로 처리하였을 때의 작물 생육을 평가한 연구는 미비한 수준이며, 추가적으로 많은 연구가 필요한 반면 CR 처리에 따른 작물 생육 증진과 관련된 연구는 매년 꾸준히 진행되고 있다(Kumar et al., 2013; Lee et al., 2019; Dong et al., 2020; Chun et al., 2022; Kang et al., 2022).

Table 4. Growth characteristics of Lettuce based on different organic amendments.

Treatments	Fresh weight (g)	Moisture (%)	Leaf			Chlorophyll content (SPAD)	
			Length (cm)	Width (cm)	Counts (ea·plant ⁻¹)		
Acidic	Control	45.45 ± 11.46b	92.26 ± 0.17a	16.99 ± 1.59b	9.49 ± 0.76ab	22.33 ± 3.21a	23.23 ± 1.82a
	RH	87.14 ± 7.96a	92.38 ± 0.93a	19.87 ± 0.76a	10.92 ± 0.73a	23.67 ± 1.53a	26.57 ± 4.56a
	CR	79.07 ± 14.61a	92.32 ± 0.73a	19.43 ± 1.83a	10.64 ± 0.92a	23.67 ± 0.58a	23.84 ± 4.41a
Non-acidic	Control	63.39 ± 8.91b	92.30 ± 0.02a	17.74 ± 0.72b	9.94 ± 0.44b	24.67 ± 3.51a	22.78 ± 4.28a
	RH	84.72 ± 34.70a	92.59 ± 1.28a	20.26 ± 0.92a	11.39 ± 1.57a	24.00 ± 3.61a	25.89 ± 2.16a
	CR	83.85 ± 16.03a	92.18 ± 0.80a	19.52 ± 1.13a	11.10 ± 0.89a	26.33 ± 3.21a	25.60 ± 0.73a
p-value	**	***	**	*	**	**	

RH, rice husk; CR, carbonized rice husk.

*, **, and *** are used to indicate statistically significant differences at the $p < 0.05$, $p < 0.01$, and $p < 0.001$, respectively.a, b: Each value with different letters within a column are significantly different from each other as determined by Duncan's multiple range test ($p < 0.05$).

Table 5는 토양 pH와 상추의 생육을 조사한 항목간의 상관관계를 분석한 결과이며, 토양 pH는 생육 특성과 양 (+)의 상관관계를 나타내는 것으로 조사되었다. 이는 산성화된 토양에서 토양 pH 개선은 토양의 화학성을 개선할 뿐만 아니라 작물의 생육도 증진시킬 수 있음을 나타내며, 특히 상추의 엽폭(Pearson's $r = 0.400$)이 토양 pH에 가장 큰 영향을 받는 것으로 확인되었다. 또한, 생육 지표간 비교에서도 생체중과 엽수(Pearson's $r = 0.835$), 엽장과 엽폭(Pearson's $r = 0.737$)이 서로 밀접한 관련을 갖는 것으로 나타났다. 하지만, 본 연구에서는 유기개량제의 산성화 토양 개선 효과 확인을 위해 비교적 좁은 범위에서 이루어졌기 때문에 본 연구의 결과는 토양 pH가 pH 6.50 이하일 때 적용 가능 할 것으로 생각된다.

Table 5. Pearson correlation matrix between soil pH and growth parameters.

Treatments	Fresh weight	Leaf length	Leaf width	Leaf counts	Chlorophyll content	Soil pH
Fresh weight	1.000***					
Leaf length	0.541**	1.000***				
Leaf width	0.835**	0.737*	1.000***			
Leaf counts	0.663*	0.032**	0.415**	1.000***		
Chlorophyll content	0.607**	0.569*	0.638**	0.334***	1.000***	
Soil pH	0.329***	0.348**	0.400***	0.250*	0.234**	1.000***

*, **, and *** are used to indicate statistically significant differences at the $p < 0.05$, $p < 0.01$, and $p < 0.001$, respectively.

작물 내 양분 함량은 토양 pH에 따라 구분하였으며, Fig. 1에 나타내었다. 작물 내 탄소(C) 함량은 산성화 토양에서는 RH (37.97%) 처리 시 가장 낮은 반면 일반 토양에서는 39.00%로 가장 높게 측정되었다. 하지만, 토양 pH별 처리구 사이의 통계적 유의차는 나타나지 않았다. 또한, 같은 처리구일지라도 토양 pH가 상대적으로 높은 일반 토양에서 작물 내 탄소 함량이 높은 것으로 조사되었다. 선행연구에서는 작물 내 탄소는 작물의 기본 구조를 유지하고, 각종 대사 기능을 활성화하는 생화학적 물질의 기본 원소로 작물 생육을 나타내는 지표로 보고하였다(Ma et al., 2018). 본 연구에서는 산성화 토양에 비해 일반 토양에서 작물 내 탄소 함량이 높게 측정되었으며, 이는 토양 pH 개선이 작물 생육을 증진시킬 수 있음을 나타낸다고 판단하였다. 작물 내 질소(N)와 인산(P_2O_5) 함량은 탄소 함량과 유사하게 산성화 토양에 비해 일반 토양에서 높게 측정되었으며, CR을 처리하였을 때 가장 높게 증가하였다. 반면, 칼륨(K_2O) 함량은 CR 처리 시 5.72%와 5.18%로 가장 높게 증가하였으나 토양 pH가 낮을수록 함량이 증가하였다. Penn과 Camberato (2019)는 토양의 pH가 pH 4.0 이하에서는 철(Fe)에 의해 토양에 강하게 고정되며, 토양 pH가 pH 6.5일 때 작물의 인산 이용 효율이 가장 높게 증가한다고 보고하였다. 본 연구에서도 CR 처리 시 토양 pH가 pH

6.34로 가장 높게 증가하였으며, 상추 내 인산 함량도 가장 높게 조사되었다. 또 다른 선행연구에서는 인산과 마찬가지로 질소도 토양 pH가 증가함에 따라 유효도가 증가하여 작물 내 흡수가 용이하며, 이는 질소를 전환시키는 박테리아의 활성이 증가한 결과로 보고하였다(Fageria et al., 2008).

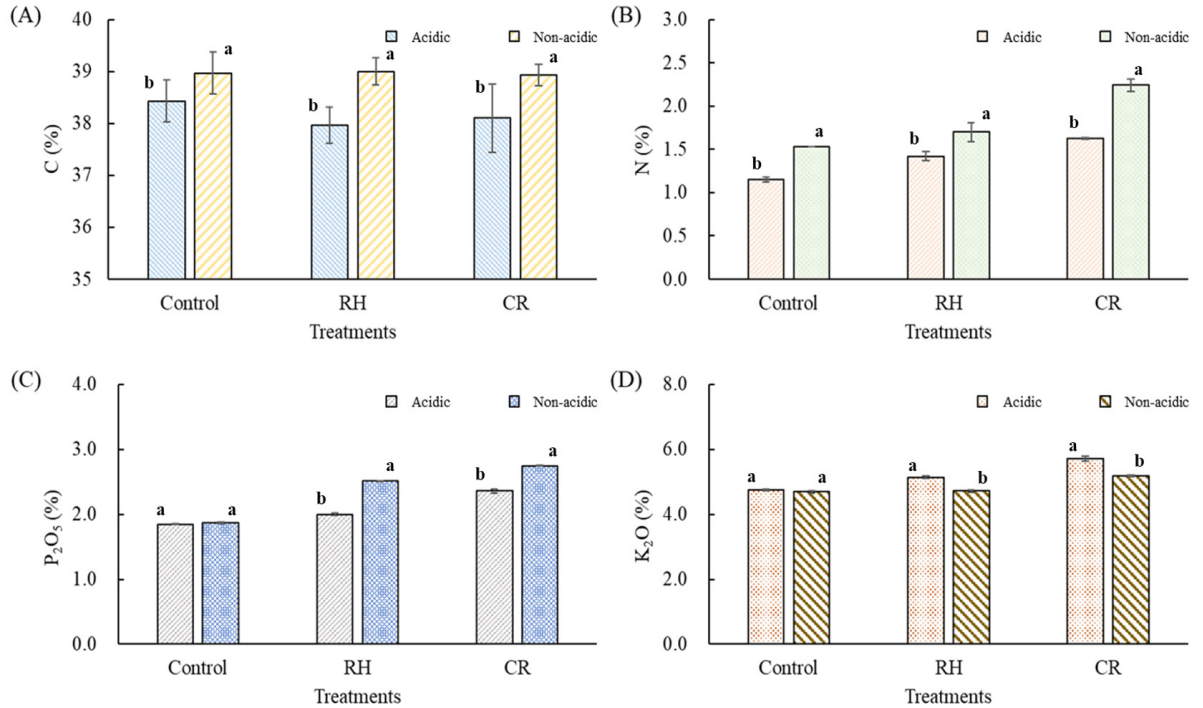


Fig. 1. Constituent elements content of lettuce. Each value with different letters within a column is significantly different from each other as determined by Duncan's multiple range test ($p < 0.05$). (A) Carbon (C) content of lettuce; (B) Nitrogen (N) content of lettuce; (C) Phosphorus (P_2O_5) content of lettuce; (D) Potassium (K_2O) content of lettuce. Control, inorganic fertilizers treatment; RH, rice husk and inorganic fertilizers treatment; CR, carbonized rice husk and inorganic fertilizers treatment.

Conclusion

본 연구는 토양 pH가 다른 두 토양에 유기개량제 처리 시 작물 생육 및 토양에 미치는 영향을 평가하기 위해 수행되었다. 토양 pH에 따른 작물 생육 특성을 평가하기 위한 상추를 이용하여 실험을 실시하였으며, 왕겨 원물과 탄화 왕겨를 각각 처리한 후 작물의 생육을 비교하였다. 작물 생육은 왕겨 원물을 처리하였을 때 가장 우수하였으나 탄화 왕겨 처리와 통계적 유의차를 나타내지 않았다. 이는 탄화 왕겨 처리가 토양 pH를 증가시켜 작물 생육을 증진시킨 것으로 판단하였다. 또한, 작물의 생육 지표와 토양 pH 사이의 상관관계 분석 시 서로 양(+)의 상관관계를 나타내어 토양 pH가 증가함에 따라 작물 생육이 증가함을 확인하였다. 각 유기개량제를 토양에 처리 시 토양의 pH를 증가시킬 뿐만 아니라 치환성 Na^+ 함량을 제외한 다른 화학적 특성을 증가시켰으며, 토양 EC와 유효 인산 함량은 왕겨 원물을 처리하였을 때 가장 높게 증가하였다. 탄화 왕겨 처리는 왕겨 원물에 비해 토양 EC와 유효 인산 함량의 증가는 다소 낮았으나 토양 내 탄소 함량을 비롯한 질소 함량, 유기물 함량, 유효 질소 함량 등을 높게 증가시켰다. 상추의 양분 이용 효율을 평가하기 위한 상추 내 구성 원소 분석 시 칼륨을 제외한 모든 항목이 일반 토양에서 산성화 토양에 비해 높게 조사되었으며, 탄화 왕겨 처리 시 증가하는 경향을 나타내었다. 따라서, 산성화된 토양의 pH 개선은 농업 생산성을 증진시키기 위해 필수적이며, 농업잔재물을 열 분해한 후 이용하는 것이 토양 pH 개선 및 농업 생산성 증대에 유리하다고 판단된다.

Conflict of Interests

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

Acknowledgements

This research study was conducted with support from a research grant awarded by the Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development of Rural Development Administration, Republic of Korea (Project No. PJ0170282023).

Authors Information

Yun-Gu Kang, <https://orcid.org/0000-0001-5368-5910>

Jun-Yeong Lee, <https://orcid.org/0000-0001-7486-3405>

Jun-Ho Kim, <https://orcid.org/0000-0001-7678-1657>

Taek-Keun Oh, <https://orcid.org/0000-0003-0215-0427>

Yeo-Uk Yun, Chungnam Agricultural Research and Extension Services, Researcher

References

- Cai A, Zhang W, Xu M, Wang B, Wen S, Shah SAA. 2018. Soil fertility and crop yield after manure addition to acidic soil in South China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 111:61-72.
- Chun JH, Kang YG, Lee JH, Yun YU, Oh TK, Yoon MH. 2022. The combined effect of nitrogen and biochar amendments on the yield and glucosinolate contents of the Chinese cabbage. *Journal of King Saud University-Science* 34:101799.
- Dong L, Wang J, Shen M, Zhang H, Wang L, Li C, Lu C. 2020. Biochar combined with nitrogen fertilizer affects soil properties and wheat yield in medium-low-yield farmland. *Soil Use and Management* 38:584-595.
- Fageria NK, Baligar VC, Li YC. 2008. The role of nutrient efficient plants in improving crop yields in the twenty first century. *Journal of Plant Nutrition* 31:1121-1157.
- Goulding KWT. 2016. Soil acidification and the importance of limiting agricultural soils with particular reference to the United Kingdom. *Soil Use and Management* 32:390-399.
- Hailegnaw NS, Mercl F, Pračke K, Száková J, Tlustoš P. 2019. Mutual relationships of biochar and soil pH, CEC, and exchangeable base cations in a model laboratory experiment. *Journal of Soils and Sediments* 19:2405-2416.
- Ito K, Katagiri Y. 2021. Relation of tree decline and, soil pH and exchangeable cations contents in a *Chamaecyparis obtuse* shrine grove, Nara Japan. *Environmental Science* 34:208-213.
- Kang YG, Chun JH, Lee JH, Park SY, Luyima D, Oh TK, Yun YU. 2022. Effects of varying rates of nitrogen and biochar pH on NH₃ emissions and agronomic performance of Chinese cabbage (*Brassica rapa* ssp. *pekinensis*). *Agronomy* 12:61.
- Kang YG, Lee JH, Chun JH, Oh TK. 2021. Adsorption characteristics of NH₄⁺ by biochar derived from rice and maize residue. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 40:161-168. [in Korean]
- Kim J, Park SJ, Shin D, Moon DH, Kim YG, Ryu BC, Park JH. 2018. Effect of ameliorant with bauxite byproduct on the germination and growth of lettuce by acidic soil neutralization. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* 40:258-266. [in Korean]

- Kim YN, Cho JY, Yoon YE, Choe HJ, Cheong MS, Lee M, Kim KR, Lee YB. 2021. Influences of phosphogypsum application on soil property and yield and quality of onion (*Allium cepa* L.). *Korea Journal of Soil Science and Fertilizer* 54:141-150. [in Korean]
- Kumar S, Sangwan P, Dhankhar RMV, Bidra S. 2013. Utilization of rice husk and their ash: A review. *Research Journal of Chemical and Environmental Sciences* 1:126-129.
- Lee JH, Luyima D, Ahn JY, Park SY, Choi BS, Oh TK, Lee CH. 2019. Effect of different biochar formulations on the growth of cherry tomatoes. *Korean Journal of Agricultural Science* 46:931-939. [in Korean]
- Ma S, He F, Tian D, Zou D, Yan Z, Yang Y, Zhou T, Huang K, Shen H, Fang J. 2018. Variations and determinants of carbon content in plants: A global synthesis. *Biogeosciences* 15:693-702.
- Meena RS, Kumar S, Bohra JS, Lai R, Yadav GS, Pandey A. 2019. Response of alley cropping-grown sesame to lime and sulphur on yield and available nutrient status in an acidic soil of Eastern India. *Energy, Ecology and Environment* 4:65-74.
- Penn CJ, Camberato JJ. 2019. A critical review on soil chemical processes that control how soil pH affects phosphorus availability to plants. *Agriculture* 9:120.
- RDA (Rural Development Administration). 2022. Fertilization standard of crop plants. National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Wanju, Korea.
- Shetty R, Prakash NB. 2020. Effect of different biochars on acid soil and growth parameters of rice plants under aluminum toxicity. *Scientific Reports* 10:12249.
- Shin D, Jo YT, Park, SJ, Park JH. 2019. Acidic soil improvement and physicochemical characteristics using red-mud and biochar. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* 41:483-493. [in Korean]
- Singh G, Mavi MS, Choudhary OP, Kaur M, Singh B. 2022. Interaction of pyrolysed and un-pyrolysed organic materials enhances carbon accumulation in soil irrigated with water of variable electrical conductivity. *Soil and Tillage Research* 215:105193.
- Song D, Tang J, Xi X, Zhang S, Liang G, Zhou W, Wang X. 2018. Response of soil nutrients and microbial activities to additions of maize straw biochar and chemical fertilization in a calcareous soil. *European Journal of Soil Biology* 84:1-10.