

Research Article



CrossMark

Open Access

음식폐기물바이오차의 염분 제거 및 농업적 활용

김신실¹, 노준석¹, 이재훈¹, 최아영¹, 이슬린¹, 박유진¹, 박종환², 이영한^{3*}, 서동철^{1*}

¹경상국립대학교 응용생명과학부(BK21 Four) & 농업생명과학연구원, ²동아대학교 생명자원과학대학 생명자원산업학과, ³경상남도농업기술원 연구개발국 유용곤충연구소

Salt Removal and Agricultural Application of Food Waste–Biochar

Sin-Sil Kim¹, Jun-Suk Rho¹, Jae-Hoon Lee¹, Ah-Young Choi¹, Seul-Rin Lee¹, Yu-Jin Park¹, Jong-Hwan Park², Young-Han Lee^{3*} and Dong-Cheol Seo^{1*} (¹Division of Applied Life Science(BK21 Four) & Institute of Agriculture and Life Science, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea, ²Department of Life Resources Industry, College of Natural Resources and Life Science, Dong-A University, Busan 49315, Korea, ³Research and Development Bureau, Gyeongsangnam-do Agricultural Research and Extension Services, Jinju 52733, Korea)

Received: 15 June 2023/ Revised: 21 June 2023/ Accepted: 27 June 2023

Copyright © 2023 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

Sin-Sil Kim

<https://orcid.org/0000-0003-2427-4164>

Jun-Suk Rho

<https://orcid.org/0000-0003-2100-5903>

Jae-Hoon Lee

<https://orcid.org/0000-0002-5517-8987>

Ah-Young Choi

<https://orcid.org/0000-0002-5811-2051>

Seul-Rin Lee

<https://orcid.org/0000-0003-4674-1974>

Yu-Jin Park

<https://orcid.org/0000-0001-8841-4504>

Jong-Hwan Park

<https://orcid.org/0000-0001-7296-0439>

Young-Han Lee

<https://orcid.org/0000-0002-0147-4932>

Dong-Cheol Seo

<https://orcid.org/0000-0001-8515-0670>

Abstract

Food waste (FW) emissions in South Korea amounted to 4.77 million tons in 2021, and continue to increase. Various technologies have been developed to treat FW, with recent research focusing on biochar production through pyrolysis to reduce FW. However, the agricultural application of food waste-biochar (FWBC) is limited by the salt accumulated during pyrolysis. This

study investigated salt removal from and the kinetic characteristics of FWBC, and subsequently evaluated its agricultural applications. FW was pyrolyzed at 350°C for 4 h, and subsequently washed for 0.1, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 5, 15, and 30 min to remove salt. FWBC had a salt concentration of 5.75%, which was effectively removed through washing. The salt concentration decreased rapidly at the beginning (1 min) and then slowly decreased, unlike in FW, in which the salt decreased continuously and slowly. The salt removal speed constant (K) was 1.5586 (Stage 1, FWBC) > 0.0445 (Stage 2, FWBC) > 0.0026 (FW). In a lettuce cultivation experiment, higher biomass was achieved using washed FWBC than when using unwashed FWBC and FW, and soil properties were improved. Overall, these findings

*Corresponding author: Dong-Cheol Seo
Phone: +82-55-772-1963; Fax: +82-55-772-1969;
E-mail: dcseo@gnu.ac.kr

*Co-corresponding author: Young-Han Lee
Phone: +82-55-254-1960; Fax: +82-55-254-1119;
E-mail: lyh2011@korea.kr

suggest that although FW reduction using pyrolysis causes a salt accumulation problem, the salt can be effectively removed through washing. The use of washed FWBC can enhance plant growth and soil properties.

Key words: Food waste, Food waste-biochar, Lettuce cultivation, Salt removal, Salt removal speed

서론

국내에서 발생하는 음식폐기물의 현황은 2021년 음식물류 폐기물 처리시설 현황에 대한 환경부 보고서에 의하면 2021년 기준 연간 477만 톤 가량이 발생하고 있으며, 345개의 공공 및 민간 시설에서 처리되고 있다. 전 세계적으로 음식폐기물을 감량하기 위한 다양한 방법을 연구하고 있지만 음식폐기물의 특성상 수분이 70% 이상 함유되어 있어 부패가 쉽고 악취를 유발하여 처리에 어려움을 겪고 있다. 또한 2005년 폐기물관리법에서 음식폐기물의 직매립을 금지하였고, 2013년 런던협약에 가입함에 따라 음식폐기물의 해양배출이 금지되어 심각한 환경문제가 발생하여 이들을 자원화하기 위한 새로운 방안이 필요한 실정이다[1].

음식폐기물의 대표적인 자원화 및 처리방법은 혐기성 소화를 통해 메탄 가스와 같은 바이오 에너지를 생산하거나, 호기성 퇴비화를 통한 퇴비 생산이 주로 이루어지고 있다[2,3]. 호기성 퇴비화를 통해 생산된 음식폐기물 퇴비는 다른 유기성 폐기물보다 더 높은 수준의 질소, 인 및 칼륨 등을 함유하고 있어 식물에 유익한 영양분을 제공할 수 있다[3,4]. 하지만 퇴비화는 넓은 부지 면적이 필요하고 60-80일 정도의 긴 부숙 시간이 소요되며, 음식폐기물 퇴비의 불균질화는 토양의 영양 불균형을 일으켜 식물 성장에 해를 끼칠 수 있다. 특히 음식폐기물은 4% 이상의 염분이 함유되어 있어 염분 처리 공정을 거치지 않고 비료로 사용 시 식물 성장과 수확량을 감소시킬 뿐만 아니라 토양에 염류 집적 등의 부정적인 영향을 미칠 수 있다[5-7]. 비료 공정규격에서는 음식폐기물 퇴비의 염분함량이 2% 이내일 경우만 퇴비로써 사용을 허가하고 있다. 하지만 음식폐기물은 높은 함수율로 인해 물 세척만으로 기존 염분을 일정 수준 이하로 제거하기엔 한계가 있으며, 퇴비화 전후로 진행되는 세척과정에서 다량의 세척수가 발생하여 지역 수자원 확보에 부담이 될 수 있다[8].

현재 이러한 음식폐기물의 해양투기금지로 인한 환경오염 부담을 줄이기 위해 감량화 중심의 처리기술이 개발되고 있으며, 최근 열분해를 통해 음식폐기물을 바이오차로 감량화 하는 해결안이 제시되고 있다. 음식폐기물을 열분해 할 경우 시료의 함수율이 높아 80% 이상의 감량 효과를 가져올 수 있어 40-50% 정도 감량화되는 퇴비화보다 효과적으로 음식폐기물을 감량화 할 수 있다[1]. 또한 음식폐기물이 열분해될 경우 제조되는 바이오차는 기존 음식폐기물에 존재하던 다량의 무기양분과 유기물이 잔존하게 되고, 열분해 과정에서 다량의 다공성 탄소 구조가 형성되어 우수한 토양개량제로서 사용할 수 있는

것으로 알려져 있다[9]. 바이오차의 토양개량제로서의 활용은 탄소 격리 효과와 온실가스 감축 효과를 가지고 있어 탄소 중립의 탄소흡수원으로 활용될 수 있는 것으로 알려져 있다[10]. 이에 음식폐기물은 바이오차 제조를 통한 폐기물 감량화 및 탄소격리 효과를 가지는 토양개량제로서 활용 가능성이 높지만 열분해 과정에서 농축된 염분을 효과적으로 처리할 수 있는 기술이 필요한 것으로 판단된다.

따라서 본 연구는 음식폐기물을 효율적으로 감량화하고 염분제거를 통한 자원화 효율성을 높이기 위해 음식폐기물을 저온 열분해하여 바이오차로 제조한 후 물세척에 의한 염분제거 가능성을 평가하고, 물세척에 의한 염분제거속도를 구명하였다. 또한 음식폐기물 바이오차의 토양개량제로서의 가능성을 확인하고자 바이오차 내 염분 함유 유무가 상추 생육에 미치는 영향을 조사하였다.

재료 및 방법

공시 재료

공시 음식폐기물(FW)은 음식폐기물 처리장(형제 영농 조합 법인)에서 채취하였다. FW는 도가니에 담아 열분해 장치(GK-1015model (주)STL, Korea)에 넣은 후, 무산소 조건을 형성하기 위해 N_2 gas (10 psi)를 주입하였다. 이후 350°C의 온도 조건으로 4 hr 동안 저온 열분해 하였다. FW와 제조된 음식폐기물 바이오차(FWBC)의 이화학적 특성은 Table 1에서 보는 바와 같다. 실험에 사용된 FW의 pH는 5.13으로 약산성이고 수분함량은 70.6%로 탈수가 되었음에도 매우 높았으며, 염분 함량은 3.66%로 일반적인 음식폐기물과 유사한 수준이었다[7]. 열분해된 FWBC의 pH는 8.94 약알칼리성이었고, 탄소함량은 72.3%로 대부분 탄소로 구성되어 있었으며, 염분 함량은 FW에 비해 약 2.0% 이상 농축되어 5.75% 정도였다. Cao 등 [11]에 의하면 분뇨의 염분함량은 열분해 과정 중 휘발되는 수분 및 휘발성 물질(VOCs)과 달리 휘발하지 않고 농축된다고 보고된 바 있는데 본 실험에서도 이와 유사하였다. 또한 FWBC의 P, K, Ca 및 Mg 함량은 각각 4.12, 1.64, 8.02 및 0.31%로 음식폐기물 원시료에 비해 약간 증가되었다.

포트 시험에 사용된 공시토양은 경상국립대학교 부속농장에서 토양을 채취하였으며 물리화학적 특성은 Table 2에서 보는 바와 같다. 포트 시험에 사용된 작물은 상추(*Lactuca sativa* L.)를 사용하였다.

실험방법

FWBC의 물세척 여부에 따른 염분함량 변화

FWBC의 염분 함량과 물세척으로 인한 염분제거가 가능한지 알아보기 위해 물세척 시간에 따른 염분함량을 조사하였다. 물세척은 실온에서 바이오차와 증류수를 1:100 비율로 혼합하여 170 rpm으로 교반하였다. 물세척은 처리시간을 0.1, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 5, 15 및 30 min으로 달리하여 시간에 따른 염분 함량의 변화를 측정하였다. 세척된 바이오차의 염분 함량 변화는 Ion Chromatography를 통해 Cl^- 함량을 측정하여

Table 1. The chemical properties of FW and FWBC used

Sample	pH	EC	T-N	C	P	K	Ca	Mg	NaCl	WC
	(1:10)	(dS m ⁻¹)				(%)				
FW	5.13±0.2	7.60±0.06	2.58±0.50	40.02±0.69	2.10±0.03	0.89±0.07	3.66±0.10	0.16±0.01	3.66±0.44	70.6±2.88
FWBC	8.94±0.04	5.28±0.4	2.89±0.60	72.3±0.48	4.12±0.11	1.64±0.27	8.02±2.08	0.31±0.05	5.75±0.72	0.07±0.03
Washed FWBC	8.63±0.08	1.14±0.09	2.77±0.08	71.9±0.71	4.16±0.12	1.41±0.17	7.68±0.59	0.30±0.07	0.33±0.01	0.06±0.02

Table 2. The chemical properties of the soil used pot test

Sample	pH (1:5)	EC (dS m ⁻¹)	P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	OM (%)	1N NH ₄ OA _c extractable cation (cmol _c kg ⁻¹)				NaCl (%)
					K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	
Soil	6.75±0.05	0.16±0.06	498±24	1.1±0.12	0.71	7.12	2.31	0.10	0.14±0.08

최종적으로 NaCl 함량으로 환산하였다. 물세척에 의한 FWBC의 처리시간별 염분제거효율은 동일한 질량의 바이오차에서 기존 염분 농도 대비 반응 시간 후에 제거된 염분 농도를 통해 구하였다.

물세척시 FWBC의 염분제거속도

FWBC의 물세척에 따른 염분제거속도는 물세척에 의한 염분제거 최적시간과 제거패턴을 규명하기 위해 처리시간에 따른 염분 농도를 1차반응속도방정식($\ln(C/C_0)=-Kt$, 식1)을 이용하여 염분제거속도 상수(K)를 산출하였다.

$$\frac{\ln C}{C_0} = -Kt \quad (\text{식 1})$$

C₀ : 초기(t=0) 염분 농도

C : 세척 후(t시간 후) 염분 농도

K : 속도 상수 (min⁻¹)

t : 세척 시간 (min)

FWBC의 작물재배 포트시험

포트 시험은 1/5000a의 와그너포트에서 진행하였으며 처리조건은 무처리구(Control), 음식폐기물 처리구(FW), 음식폐기물 바이오차 처리구(FWBC) 및 염분을 제거한 음식폐기물 바이오차 처리구(washed FWBC)로 총 4개의 처리구를 구성하였다. 각 처리구에서 바이오차 투입량은 200 kg/10a되게 투입하였다. 상추의 총 재배기간은 21일간 진행되었으며 각 처리구별 작물의 생육상황, 식물체 내 염분 함량 및 토양 염분과 무기성분 함량을 분석하였다. 작물 재배는 농촌진흥청의 영농재배기술에 근거하여 진행하였으며, 작물별 시비처방기준(NAAS, 2010a)에 따라 모든 처리구에 질소-인산-가리(N-P₂O₅-K₂O=20-5.9-12.8 kg/10a)를 웃거름과 밑거름으로 동일하게 시비하였다.

분석 방법

FW와 FWBC는 입자 1-2 mm로 체거름하여 비료분석법

에 따라 분석하였으며, 공시 토양은 2 mm 이하로 체거름하여 토양분석법에 따라 분석하였다. 시료의 수분함량(%)은 가열감량법, 유기물함량(%)은 회화로법을 통해 측정하였고, pH 및 EC는 시료와 증류수를 1:10(W/V)로 혼합하여 pH meter (Orion 2 star, Thermo Fisher Scientific)와 EC meter (COM-100, HM digital)를 통해 측정하였다. 시료의 표면 관측은 Scanning Electron Microscope (Apreo S, Thermo Fisher Scientific)을 이용하였고, 표면 관능기 변화는 ATR FT-IR (Spectrum Two, Perkin Elmer)로 확인하였다. 총질소 및 무기물 함량 분석은 황산:과염소산(1:1) 혼합 분해액으로 습식 분해하여 Kjeldahl법과 ICP-OES (iCAP PRO ICP-OES, Thermo Fisher Scientific)로 구하였다. 시료의 염분 함량은 Ion Chromatography (DIONEX AQUION, Thermo Fisher Scientific)을 통해 Cl⁻ 함량(%)을 측정하여 NaCl(%)로 환산하였다. 토양 분석은 공정규격법에 따라 유기물 및 유효인산은 UV-Visible Spectrophotometer (GENESYS 150, Thermo Fisher Scientific)를 통해 측정하였고, 치환성 양이온 및 양이온 교환용량(CEC)는 1N NH₄OA_c (pH 7.0) 용액으로 추출하여 ICP-OES를 이용하여 분석하였다.

통계처리

각 처리조건별 염분함량 및 무기성분함량의 변화의 통계분석을 위해 SPSS (IBM SPSS Statistics 25) 프로그램을 사용하여 평균 및 표준편차를 구하였다. 각 처리구간의 차이를 비교하기 위해 SAS (SAS 9.4 TS Level 1M4) 프로그램을 사용하여 ANOVA (analysis of variance) 및 Duncan's Multiple Range Test를 통해 5% 이내 수준(p<0.05)에서 분석하였다.

결과 및 고찰

FWBC의 물세척 여부에 따른 염분 함량 변화

염분해된 FWBC를 물세척하였을 때 처리시간에 따른 염분 함량의 변화를 살펴보기 위해 염분제거효율과 관능기의 변화를 조사하였으며, 그 결과는 Fig. 1-2에서 보는 바와 같다. FWBC

의 초기 염분함량은 5.75%에서 1 min까지 급격히 감소하다가 이후 완만하게 감소하는 경향이었으나, 대조구인 FW의 경우 3.66%에서 처리 30 min 후까지 미미하게 감소하여 최종적으로 3.25% 정도였다.

물세척에 의한 FWBC의 처리시간별 염분제거효율은 FWBC의 경우 초기부터 0.1 min까지 20% 제거되다가 0.5 min까지 급격히 증가하여 72.9%의 제거효율을 보였으며, 30 min 세척 후에는 94.3%의 높은 제거효율을 보였다(Fig. 2b). 이와 같이 열분해된 바이오차의 염분 세척효율이 높은 것은 열분해 시 발생하는 열에 의해 수분의 기화가 발생되고 이때 염분이 수분을 따라 음식물 내부에서 바이오차의 표면으로 표출된 후 물세척 시 물에 용해되어 쉽게 씻겨 나가기 때문인 것으로 판단된다[12,13].

일반적으로 바이오매스는 열분해 시 발생하는 열에너지에 의해 바이오매스 내 원자간의 결합이 끊어지며 이때 라디칼이 형성되고, 원자 내 전자들이 끌어당겨지는 정도에 따라 입자들의 응집이 발생해 열역학적으로 안정한 형태의 탄소 골격을 형성하는 것으로 알려져 있다[14].

열분해된 FWBC를 30 min 동안 물세척한 바이오차(Washed FWBC)의 관능기 변화를 FW와 물세척 전 FWBC와 비교한 결과는 Fig. 2에서 보는 바와 같다. 음식폐기물과 같은 바이오매스는 열분해 시 유기물질이 탄화되고 방향성 구조가 형성되어 분자구조의 변형이 발생된다고 알려져 있다[15]. 960 cm^{-1} 에서 발견된 C-C skeleton peak[16]는 FW에 없었으나 FWBC와 washed FWBC 에서는 검출되었는데, 이는 음식폐기물이 열분해를 통해 탄소 육각고리의 탄소결합을 형성하였기 때문으로 판단된다. 874 cm^{-1} [16]에서 검출된 C-Cl stretching peak는 FW에서 검출되어 염분이 확인되었으며, 열분해과정을 통한 염분 농축으로 FWBC의 peak이 증가되는 경향이었으나, 염분세척을 통해 washed FWBC에서는 C-Cl peak이 두드러지게 감소하였다. 이는 물세척 시 극성이 높은 Cl^- 이온이 바이오차 표면에서 탈리되어 나타난 결과로 볼 수 있으며, 이는 열분해 후 세척에 따른 염분함량의 변화와도 일치되었다. 일반적으로 열분해시 온도가 350°C 이상으로 상승함에 따라 1060 cm^{-1} 의 C-OH rocking stretching peak와 $1620, 1735\text{ cm}^{-1}$ 의 C=O stretching peak들은 강도가 감소

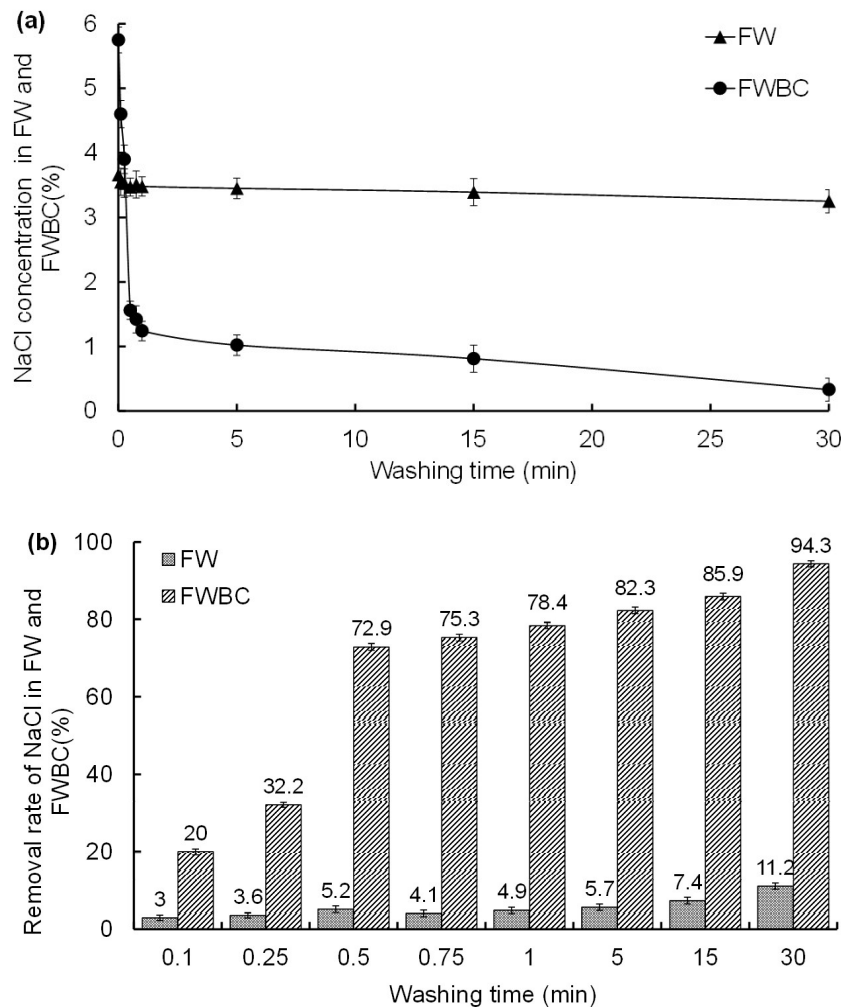


Fig. 1. NaCl concentrations(a) and NaCl removal rates(b) in FW and FWBC with washing time.

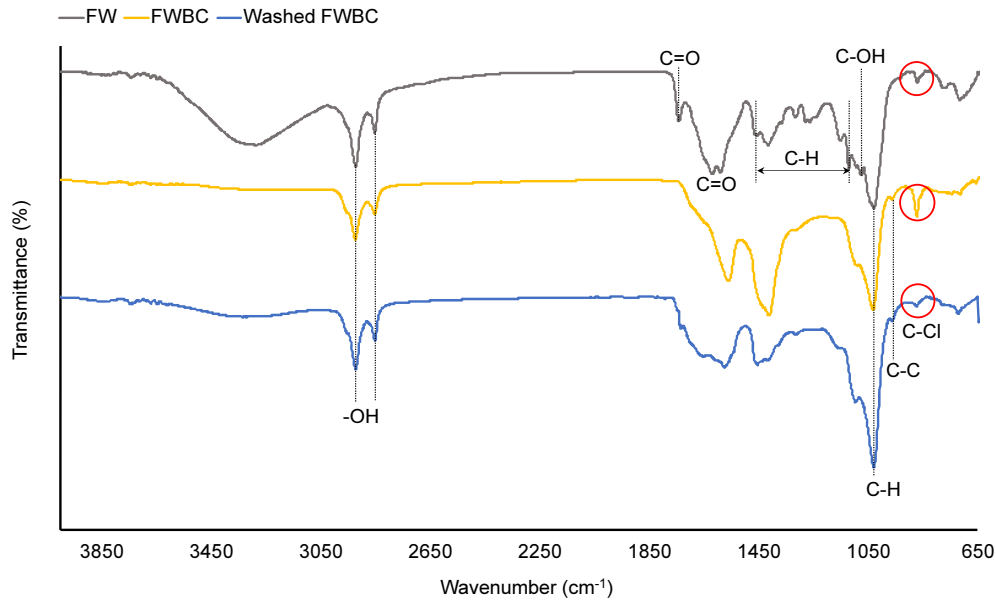


Fig. 2. ATR FT-IR spectra for FW, FWBC, and washed FWBC.

하는 것으로 알려져 있는데[17], 본 연구의 FWBC와 washed FWBC도 이와 유사하였다. 이는 FW에 존재하던 다당류 및 lactone 결합이 열분해 과정에서 부분적으로 분해된 것으로 판단된다. 1122, 1315 및 1365 cm^{-1} 에서 나타나는 C-H stretching peak[16]는 열분해로 인해 FWBC와 washed FWBC에서 감소하는 경향이였다. 1260, 1270 cm^{-1} 에서 나타나는 vinylene 구조의 C-H symmetric stretching peak[16]는 열분해시 결합이 분해되어 FWBC와 washed FWBC에서 감소하였다.

따라서 본 연구를 통해 음식폐기물 자체의 염분은 350°C의 저온 열분해를 통해 쉽게 제거되지 않음을 확인하였고, 이들의 열분해과정은 염분의 농축을 유발하여 농업적 활용에 제한요인으로 작용될 수 있음을 확인하였다. 음식폐기물로부터 제조된 염분함유 바이오차는 세척을 통해 염분제거가 가능함을 확인하여 바이오차 제조와 같은 열분해를 통해 내부 염분을 표면으로 표출시켜 효과적으로 제거할 수 있었다.

물세척시 FWBC의 염분제거속도

물세척에 의한 염분 탈리 속도를 규명하기 위해 세척 시간에 따른 FWBC의 반응비와 일차속도방정식을 통해 염분제거속도를 조사하였으며, 그 결과는 Fig. 3 및 Table 3에서 보는 바와 같다. Fig. 3a의 FW와 FWBC의 반응비(C/C_0)는 FWBC

의 경우 반응 5 min이 경과하면서 0.18로 급격히 감소하였으며, 이후 천천히 감소하여 반응 종료시점인 30 min에 0.06로 감소하였다. 이에 반해 FW의 반응비는 반응 후 5 min이 경과하면서 0.94로 미미하게 감소하였고, 반응 30 min후 최종단계에서도 0.89로 FWBC에 비해 매우 높았다.

세척 시간에 따른 염분제거속도를 규명하기 위해 일차속도 방정식을 이용하였으며 그 결과는 Fig. 3b 및 Table 3에서 보는 바와 같다. FWBC의 염분제거 패턴은 초기의 고속 염분제거패턴과 중후기의 저속 염분제거 패턴의 2단계로 구분할 수 있었고, 이와 달리 대조구인 FW의 염분제거 패턴은 세척시간에 따라 큰 차이 없이 초기부터 일정한 패턴을 보였다.

FWBC의 염분이 고속으로 제거된 stage 1에서의 일차속도 방정식은 $\ln(C/C_0) = -1.5586(t) - 0.3766$ ($R^2 = 0.7875$)로 염분제거속도 상수(K)는 1.5586이었고, stage 2 (물세척 1 min 이후)에서는 $\ln(C/C_0) = -0.04445(t) - 1.453$ ($R^2 = 0.966$)로 염분제거속도 상수(K)는 0.0445로 stage 1에 비해 35배 정도 염분제거속도가 느려졌다. 이와 같이 FWBC는 두 개의 염분제거패턴을 보이는 것은 바이오차의 공극 특성에 기인하기 때문으로 판단된다[22]. FWBC의 물세척 초기 stage 1에서는 물과 접촉이 용이한 대공극인 macropore (500 Å)와 mesopore (20-500 Å)에 붙은 염분이 물에 용해되어 초기에 쉽게 제거된 것으로 판단된다. 하지만 stage 2에서는 stage 1과 달리 미세

Table 3. The first-order reaction equation and NaCl removal speed constant(K) of FW and FWBC

Sample	Stage	First-order reaction equation (R^2) $\ln C/C_0 = -Kt$	NaCl removal speed (K, min^{-1})
FW	Stage 1	$y = -0.0026x - 0.0415$ ($R^2 = 0.938^{**}$)	0.0026
FWBC	Stage 1	$y = -1.5586x - 0.3766$ ($R^2 = 0.788^*$)	1.5586
	Stage 2	$y = -0.0445x - 1.453$ ($R^2 = 0.966^{**}$)	0.0445

(* and ** denote significance at 5 and 1% levels, respectively).

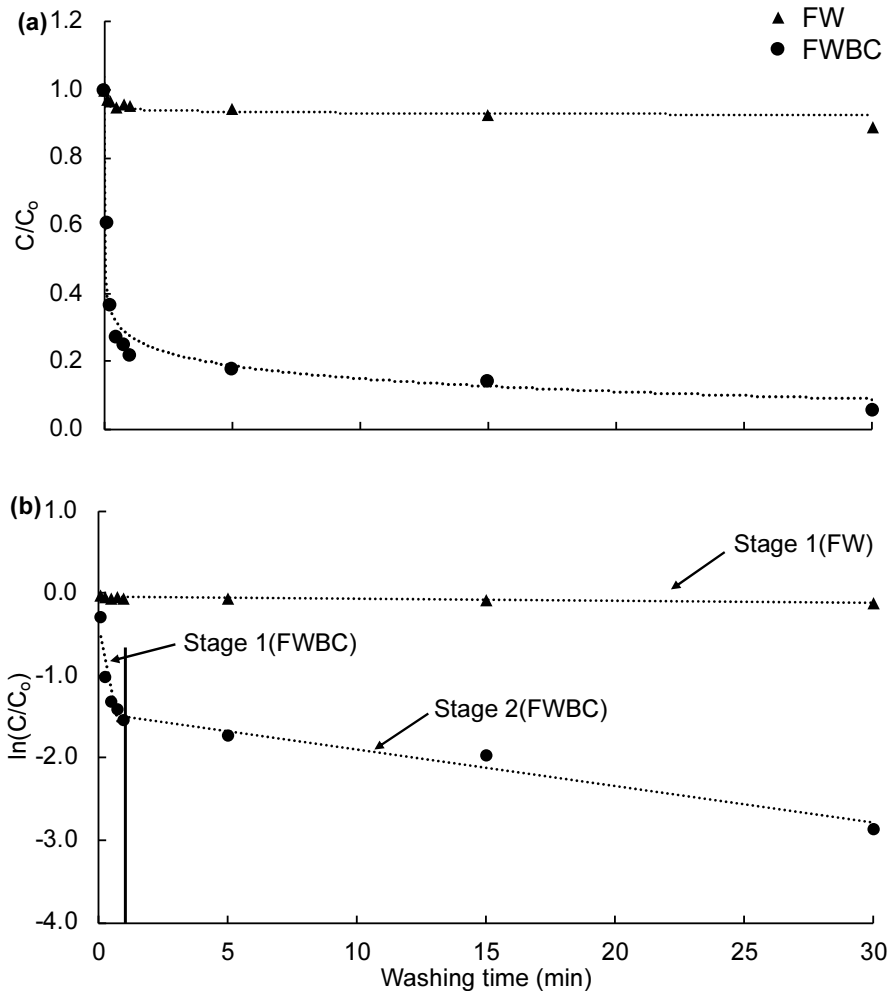


Fig. 3. The reaction ratio (a) and removal speed (b) of NaCl with washing time.

공극인 micropore (8-20 Å)와 submicropore (<8 Å)에 포함된 염분은 이들 공극까지 물이 흡수/이동하는데 대공극에 비해 상대적으로 시간이 걸려 천천히 제거된 것으로 판단된다 [19]. 이와 같이 공극 크기에 따라 염류의 용출속도가 변하는 것은 장력에 의해 물의 이동속도가 변하기 때문이다. 일반적으로 공극크기에 따른 물의 이동속도는 상대적으로 장력이 작은 대공극에서 물의 이동속도가 급격히 증가하지만, 큰 장력을 갖는 미세공극에서는 물의 이동속도가 느리고 거의 일정한 것으로 알려져 있다. 이로 인해 대공극과 미세공극을 모두 가진 바이오차는 음식폐기물에 비해 물의 흡수/이동속도가 빨라진 것으로 볼 수 있다[20].

반면에 FW의 염분제거속도 방정식은 기울기가 완만하게 감소하는 단일패턴을 보였으며, 그 식은 $\ln(C/C_0) = 0.0026(t) - 0.0415$ ($R^2 = 0.9377$)이었다. FW의 물세척에 의한 염분제거속도 상수(K)는 0.0026으로 물세척 초기부터 반응 30 min 까지 염분제거속도에 큰 차이가 없이 매우 느린 염분제거속도를 보였다. 특히 FW의 염분제거속도는 FWBC의 stage 1에 비해서 599배 느렸으며, stage 2에 비해서는 17배 정도 느렸다. 이와 같이 FW의 염분제거속도가 느린 것은 음식폐기물 내

염분은 내부에 존재하여 탈리가 쉽지 않기 때문이다.

이상의 결과에서 염분제거속도 상수(K)는 1.5589 (FWBC stage 1) > 0.0445 (FWBC stage 2) > 0.0026 (FW stage 1) 순으로 나타났다. 위 결과를 통해 열분해하여 제조된 FWBC는 물세척에 의해 염분을 제거하는데 있어 FW에 비해 짧은 시간동안 세척하여도 염분을 쉽게 제거될 수 있음을 알 수 있었다. 따라서 FW의 감량화를 위한 바이오차 등의 열분해기술로 인한 염분 농축문제를 물세척을 통해 해결하여 FW의 재활용율을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

FWBC의 작물재배 포트시험

FWBC와 washed FWBC가 상추 생육 특성 및 토양에 미치는 영향을 알아보기 위해 포트 실험을 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같다(Fig. 4-5). 상추의 포트시험에서 생육특성은 전반적으로 washed FWBC > FWBC > FW > control 순으로 좋았다. 상추 내 염분함량은 FW처리구에서 1.86%이었으나, FW를 열분해한 FWBC 처리구에서는 바이오차 내 염분함량이 5.75%로 높았음에도 불구하고 오히려 1.57%로 약간 감소하여 열분해된 이후 염분은 농축되었지만 식물의 이용율

은 약간 감소한 것으로 판단되었다. 이는 염분 함량이 높은 FW가 토양 내에서 쉽게 분해되는 유기물로 구성되어 염분을 방출하기 쉬우며, 토양에 존재하는 치환성 양이온들은 Ca^{2+} 와 Mg^{2+} 길항관계에서 이동이 유리한 Na^+ 가 식물체 내에 선택적으로 흡수되었기 때문이다[21]. FWBC처리구의 상추 내 염분 함량은 1.57%이었으나, FWBC를 세척한 washed FWBC 처리구에서는 바이오차 내 염분함량이 0.33%로 매우 낮게 투입되어 control 토양의 염분함량에 비해서도 약간 낮은 염분함량을 보였으며, 최종 수확기의 상추 내 염분함량은 1.06%로 가장 낮았다.

21일 생육된 상추의 건물중은 control, FW, FWBC 및 washed FWBC 처리구에서 각각 0.8, 2.1, 2.27 및 2.7 g pot⁻¹으로 나타났으며, 특히 control 처리구에 비해 washed FWBC 처리구가 약 238% 증가하여 가장 높았으며, 그 다음이 FWBC로 184%로 증가하였으며, FW는 163% 증가되었다.

상추 내 염분 이외의 다른 영양염류 함량은 처리구에 따라 큰 차이가 없었다.

포트시험에서 토양 내 이화학적 특성을 조사한 결과는 다음과 같다. 바이오차를 토양에 투입한 경우 토양 pH는 FWBC와 washed FWBC 처리구 모두에서 control 처리구(pH 6.74) 대비 pH 6.76-6.79 정도로 증가되었으며, pH가 8.94로 알칼리성을 띄는 FWBC의 첨가로 인해 발생된 결과로 판단된다. 높아진 토양 pH는 양이온의 이용성을 증가시켜 식물 생장에 유리한 환경을 조성한다고 알려져 있다[22]. 이로 인해 FWBC가 첨가된 처리구에서 작물 생육이 증가한 것으로 볼 수 있다. Fig. 4에서 상추 지상부 생육과 같이 바이오차가 투입된 처리구에서 뿌리 발달이 전반적으로 증가하였는데, 이는 다공성의 음식폐기물 바이오차의 투입에 의해 보수/보비력이 향상되었기 때문으로 판단된다[26]. 또한 토양 내 EC는 FWBC 처리구에서 농축된 염분에 의해 0.17 dS cm⁻¹에서 0.25 dS cm⁻¹로

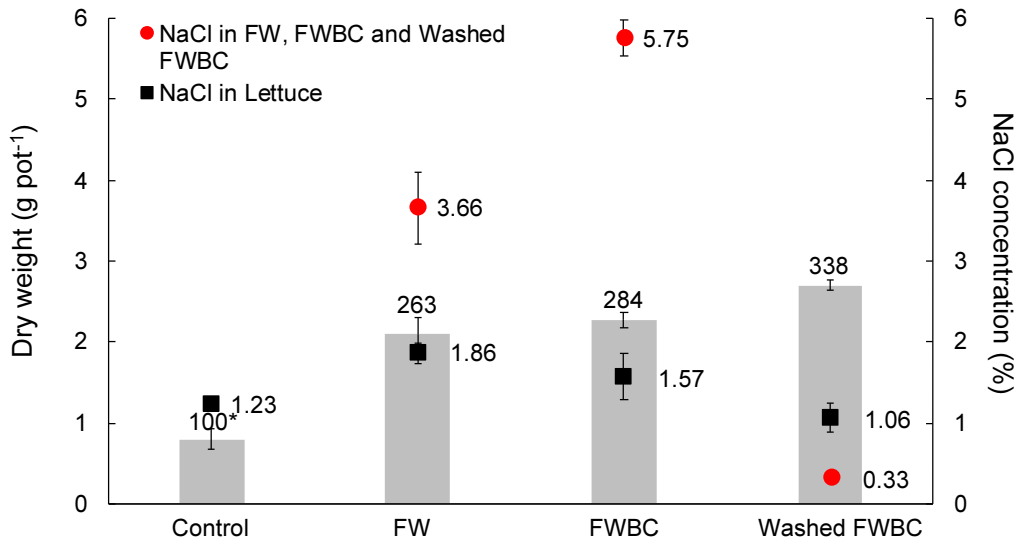


Fig. 4. Dry weight (bar) and NaCl concentration(black square) of lettuce in pot experiment. NaCl concentration (red circle) in FW, FWBC, and washed FWBC.



Fig. 5. The growth status of lettuce(*Lactuca sativa* L.) in FW, FWBC, and washed FWBC treatments.

약간 증가하였지만, washed FWBC 처리구의 경우 control 처리구와 유사하게 0.16 dS cm⁻¹로 매우 낮게 나타났다.

본 결과를 통해서 음식폐기물을 감량화하기 위한 방안으로 열분해하여 바이오차를 제조할 경우 발생하는 염분 농축문제를 해결하기 위한 방안의 일부로 열분해 후 세척하여 염분을 제거하여 사용할 경우 작물 생육의 증가와 토양 성질의 개선 효과를 가져올 수 있다고 판단할 수 있다. 이를 통해 향후 음식폐기물의 자원화 기술을 개발하기 위한 기초 자료로 활용할 수 있을 것이라 기대된다.

Note

The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgement

This work was support by Korea Institute of Planning and Evaluation for Technology in Food, Agriculture and Forestry (IPET) through Livestock Industrialization Technology Development Program (121034-3) and Technology Commercialization Support Program (821007-3), funded by Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA).

References

- O'Connor J, Mickan BS, Rinklebe J, Song H, Siddique K, Wang H, Kirkham MB, Bolan NS (2022) Environmental implications, potential value, and future of food-waste anaerobic digestate management: A review. *Journal of Environmental Management*, 318, 115519. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115519>.
- Sawayama S, Inoue S, Tsukahara K, Yagishita T, Minowa T, Ogi T (1999) Anaerobic treatment of liquidized organic wastes. *Renewable Energy*, 16(1-4), 1094-1097. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(98\)00425-X](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(98)00425-X).
- Lee BS, Nam SC, Namkoong W (2011) An evaluation of biogas production efficiencies from mechanically pretreated food waste and primary sewage sludge mixture by food waste mixing ratio through single stage anaerobic co-biogasification. *Journal of Korea Society of Waste Management*, 28, 648-660.
- Sullivan DM, Bary AI, Thomas DR, Fransen SC, Cogger CG (2002) Food waste compost effects on fertilizer nitrogen efficiency, available nitrogen, and tall fescue yield. *Soil Science Society of America Journal*, 34-40. <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.1540a>.
- Lee DJ, Lee SY, Bae JS, Kang JG, Kim KH, Rhee SS, Park JH, Cho JS, Chung J et al. (2015) Effect of volatile fatty acid concentration on anaerobic degradation rate from field anaerobic digestion facilities treating food waste leachate in South Korea. *Journal of Chemistry*, 1-9. <https://doi.org/10.1155/2015/640717>.
- Safdar H, Amin A, Shafiq Y, Ali A, Yasin R, Shoukat A, Hussan M, Sarwar M (2019) A review: Impact of salinity on plant growth. *Nature and Science* 17(1), 34-40. <https://doi.org/10.7537/marsnsj170119.06>.
- Agbna GHD, Ali AB, Bashir AK, Eltoum F, Hassan MM (2017) Influence of biochar amendment on soil water characteristics and crop growth enhancement under salinity stress. *International Journal of Engineering Works*, 4(4), 49-54.
- Kim SH, Lee SG, Yun JJ, Park JH, Kang SW, Cho JS (2022) Effect of saline soil and crop growth with bottom ash from biomass power plant based wood pellet. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 41(4), 310-317. <https://doi.org/KJEA.2022.41.4.37>.
- Park JH, Kim HC, Kim YJ, Seo DC (2020) Adsorption characteristics of anionic dye by Fe-decorated biochar derived from fallen leaves. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 39(4), 289-296. <https://doi.org/10.5338/KJEA.2020.39.4.34>.
- Agegnehu G, Bass AM, Nelson PN, Bird MI (2016) Benefits of biochar, compost and biochar-compost for soil quality, maize yield, and greenhouse gas emission in a tropical agricultural soil. *Science of The Total Environment*, 543, 295-306. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.054>.
- Cao X, Harris W (2010) Properties of dairy-manure-derived biochar pertinent to its potential use in remediation. *Bioresource Technology*, 101, 5222-5228. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.02.052>.
- Ab Ab Rani MA, Brant A, Crowhurst L, Dolan A, Lui M, Hassan NH, Hallett JP, Hunt PA, Niedermeyer H et al. (2011). Understanding the polarity of ionic liquids. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 13(37), 16831-16840. <https://doi.org/10.1039/C1CP21262A>.
- Rao MM, Reddy DK, Venkateswarlu P, Seshaiyah K (2009) Removal of mercury from aqueous solutions using activated carbon prepared from agricultural by-product/waste. *Journal of Environmental Management*, 90(1), 634-643. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.12.019>.
- Kyzas GZ, Deliyanni EA, Matis KA (2016) Activated carbons produced by pyrolysis of waste potato peels: Cobalt ions removal by adsorption. *Colloids and Surface A: Physicochemical and Engineering Aspects*,

- 490, 74-83. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2015.11.038>.
15. Novak JM, Lima I, Xing B, Gaskin JW, Steiner C, Das KC, Ahmedna M, Rehrah D, Watts DW et al. (2009) Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand. *Annals of Environmental Science*, 3, 195-206.
 16. Socrates G (2004) Infrared and raman characteristic group frequencies: tables and charts, pp. 100-150, 3rd edition, John Wiley & Sons.
 17. Cantrell KB, Hunt PG, Uchimiya M, Novak JM, Ro KS (2012) Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar. *Bioresource Technology*, 107, 419-428. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.084>.
 18. Agegnehu G, Bass AM, Nelson PN, Bird MI (2016) Benefits of biochar, compost and biochar-compost for soil quality, maize yield, and greenhouse gas emission in a tropical agricultural soil. *Science of the Total Environment*, 543, 295-306. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.054>.
 19. Rho JS, Lee JH, Lee SL, Park JH, Seo DC (2022) Evaluation of water absorption speed for litter materials to improve the water control ability of livestock litter. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 41(1), 24-31. <https://doi.org/10.5338/KJEA.2022.41.1.04>.
 20. Joo SH, Gwak YS, Kim SJ, Kim J, Kim SH (2009) Seasonal characteristics of pore development and hydraulic properties of surface soil in two forested watershed. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 151-161.
 21. Chan KY, Zwieten LV, Meszaros I, Downie A, Joseph S (2007) Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. *Soil Research*, 45(8), 629-634. <https://doi.org/10.1071/SR07109>.
 22. Steiner C, Glaser B, Geraldte Teixeira W, Lehmann J, Blum WE, Zech W (2008) Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central amazonian ferralsol amended with compost and charcoal. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 171(6), 893-899. <https://doi.org/10.1002/jpln.200625199>