

# 왕겨 바이오차 및 음식물쓰레기 바이오차가 밭 사양토에서 상추발아 및 수용성 유기탄소 용출에 미치는 영향 평가

한경화 · 장용선 · 정강호 · 조희래 · 손연규\*

농촌진흥청 국립농업과학원 토양비료과

## Evaluating germination of lettuce and soluble organic carbon leachability in upland sandy loam soil applied with rice husk and food waste biochar

Kyung-Hwa Han, Yong-Seon Zhang, Kang-Ho Jung, Hee-Rae Cho, Yeon-Kyu Sonn\*

Soil and Fertilizer, National Academy of Agricultural Science, RDA, Wanju, 565-851, Korea

Received on 16 October 2014, revised on 6 November 2014, accepted on 12 November 2014

**Abstract :** This study was carried out to evaluate the effect of rice husk (RHB) and food waste biochar (FWB) on upland soil with sandy loam texture, in terms of physico-chemical analysis, lettuce seed germination test, and organic carbon leaching experiment. RHB and FWB had different physico-chemical properties each other. Carbon to nitrogen ratio (C/N ratio) of RHB was 32, showing two times higher than that of FWB. FWB had high salt and heavy metal content, compared to RHB. This is probably due to different ingredients and production processing between two biochars each other. Results of germination test with Lettuce showed lower germination rate when FWB was applied because of higher salt concentration compared to control and RHB. Organic carbon leaching test using saturated soil column ( $\Phi 75 \times h 75$  mm) with 10 MT  $ha^{-1}$  biochar application rate, showed higher saturated hydraulic conductivity in rice husk biochar treatment column, compared to control and food waste biochar treatment. The highest total organic carbon concentration in column effluent was lower than those in both of rice husk biochar and food waste biochar, whereas the differences was negligible after 9 pore volumes of effluent. Consequently, biochars from byproducts such as rice husk and food waste in sandy loam textured upland soil could enhance a buffer function such as reduction of leaching from soil, but the harmful ingredient to crops such as high salt and heavy metals could limit the agricultural use of biochars.

**Key words :** Rice husk biochar, Food waste biochar, Lettuce germination, Soil organic carbon, Sandy loam upland soil

### I. 서론

바이오차는 바이오매스의 열분해(pyrolysis)에 의해 생성된 고형 부산물이다. 전통적인 숯(charcoal)은 주로 연소를 위한 연료로 사용되었으나 바이오차는 기후변화의 완화, 토지생산성 개선, 재생에너지 생산 등에 다양하게 이용될 수 있다. 특히 토양에 시용하였을 때, 상대적으로 미생물 분해에 안정하여 탄소를 토양에 중장기적으로 저장함으로써 온실가스배출을 저감할 수 있는 장점이 있어 최근 관심이 모아지고 있다. 뿐만 아니라 산도감소, 양분보유력 및

수분보유력 증가 등의 토양개량효과 또한 보고되고 있어 비옥도가 낮은 토양에서 시용해 볼만한 물질이다(Butnan et al., 2015; Glaser et al., 2001; Jeong et al., 2008; Lehmann et al., 2003; Liang et al., 2006; Yun et al., 2004).

바이오차는 수백 년에서 수천 년까지 전환시간을 가져 적어도 100년 이상은 안정하게 분해되지 않고 토양에 존재하여 대기 중으로  $CO_2$ 를 배출하지 않을 수도 있으나(Singh and Cowie, 2008) 계분으로부터 유래한 바이오차는 수십 년 정도의 상대적으로 짧은 전환시간을 가질 수 있다고 보고되고 있다(Lehmann et al., 2006). Nguyen 등(2008)은 장기연구포장 중 산림에서 농경지로 전환된 지역에서 전환

\*Corresponding author: Tel: +82-63-238-2425

E-mail address: [sonnyk@korea.kr](mailto:sonnyk@korea.kr)

된 기간별로 바이오차의 분해속도 및 이동과정 연구에서 바이오차는 처음 30년 동안 12.7 mg C g<sup>-1</sup>에서 3.8 mg C g<sup>-1</sup>으로 빠르게 감소하였고, 그 후로는 정류상태로 더 이상 감소하지 않았다고 발표하였다. 따라서 바이오차의 초기의 빠른 감소는 분해에 의해 초래된 것이라기보다는 이동에 기인된 것으로 판단하였다. Major 등(2009)은 토양 중의 바이오차 감소 원인을 구명하기 위한 안정 동위원소 실험 결과에서, 2.2%의 바이오차는 토양 호흡에 의해 제거되었으며, 대부분의 탄소는 용존 및 입자상 유기탄소 형태로 용탈 또는 유거에 의해 유실되었음을 밝혔다.

바이오차는 토양에서 다양한 물질을 흡착할 수 있는데 (Schmidt and Noack, 2000; Ghosh et al., 2000) 중금속 등 유해물질, 수계 부영양화 유발물질인 인 및 수용성 유기물질 등이 포함된다. 농경지 양분 및 수용성 유기물질은 점토함량 및 유기물함량이 낮은 사양질 토양에서 상대적으로 강우 시 물에 녹아 용탈되어 수계로 유출될 가능성이 높다 할 수 있다(Cao et al., 1999). 한편 흡착능이 큰 바이오차 등이 이러한 토양에 처리될 시 용탈되는 양분이 줄어들 수 있다.

바이오차가 작물수량에 미치는 영향에 대한 연구로 Hossain 등(2010)의 토마토 재배에서 바이오차 10톤 ha<sup>-1</sup> 사용 시 64% 증수되었다는 보고가 있었다. 그러나 Yun 등(2004)의 양파 재배에서 10 a당 300, 500 kg 목탄분말 사용 시 각각 7%, 2% 증수되었고 1,000 kg 이상에서 감소되는 경향을 나타내었다(Yun et al., 2004). Gaskin 등(2010)은 땅콩껍질과 소나무조각 바이오차가 옥수수의 생육 및 토양양분함량에 미치는 영향을 살펴보았는데, 바이오차 처리로 옥수수 수량이 증가되는 경우와 감소되는 경우가 존재하였다고 보고하였다. 특히 질소비료와 함께 땅콩껍질 바이오차 22 ton ha<sup>-1</sup>을 사용한 구에서 수량감소가 나타났고 소나무조각 바이오차에서는 사용 후 첫 작기에 수량감소가 나타났다고 보고하였다. 이는 비옥도가 낮은 토양에서 바이오차의 높은 흡착능력이 질소 등의 초기양분 유효도에 영향을 미칠 수 있다는 것을 보여준다. 아직까지 사용량의 안전 상한기준은 정해진 바 없으나 Lehmann 등

(2006)은 50톤 ha<sup>-1</sup>를 초과하지 말아야 한다고 언급했다. 호주에서 사탕수수를 원료로 생산되는 바이오차 토양 사용량은 1-30톤 ha<sup>-1</sup> 범위로 알려져 있다.

요컨대, 바이오차는 농경지 사용 시 탄소격리효과, 토양 개량효과 등의 이점이 있으나 원료 및 제조특성에 따라 그 효과가 다를 수 있다. 우리나라에서 생산되는 바이오차는 미곡처리장의 탄화시스템에서 생산된 왕겨 바이오차가 주이며 음식물쓰레기, 가축분뇨 바이오차 등도 일부 생산되고 있다. 그러나 아직 토양처리효과에 대한 연구가 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 왕겨 바이오차(RHB)와 음식물쓰레기 바이오차(FWB)를 연구대상으로 선정하여 성분함량을 분석하고 밭 사양토에 두 바이오차를 처리하여(토양처리량 10 MT ha<sup>-1</sup>) 그 효과를 항온조건에서 상추밭아을, 토양이화학적 및 토양 컬럼을 통한 수용성유기탄소의 용탈량을 통해 평가하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 시험토양 및 바이오차 분석

시험에 사용한 토양은 점토함량이 6%로 낮은 세사양토로 토양특성은 Table 1과 같다. 토양탄소함량은 약 7 g kg<sup>-1</sup>으로 비옥도가 낮은 토양이었다. 시험에 사용한 바이오 바이오차는 두 종류로, 미곡처리장의 탄화시스템을 통해 생산된 왕겨 바이오차(RHB)와 음식물쓰레기를 건조한 후 탄화시켜 얻은 음식물쓰레기 바이오차(FWB)이었다. RHB는 부산물비료로 등록되어 농경지 사용용으로 판매되고 있는 것인 반면 FWB는 탄화 후 압착시켜 번개탄 등의 연료용을 사용되고 있는 것이었다. 바이오차의 총 탄소 및 질소의 분석은 시료를 막자로 곱게 갈아 원소분석기(LECO1000, US)를 이용하여 분석하였다. 치환성양이온은 1 M NH<sub>4</sub>OAC 추출법, 양이온치환용량(CEC)는 토양을 1 M NH<sub>4</sub>OAC로 포화 후 에틸알코올로 공극의 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>를 씻어낸 후 증류법으로 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>를 정량하여 측정하였다(NIAST,

Table 1. Physico-chemical properties of studied soil.

Soil	Sand	Silt	Clay	Soil texture	Total content		
					C	N	C/N
	%	%	%		----- g kg <sup>-1</sup> -----		
Studied soil	70.3	23.7	6.0	Fine sandy loam	7.3	0.55	13

**Table 2.** Treatment of germination test.

Treatment		in Distilled water	in Soil	
			Biochar application rate	Soil water content (%)
Control		0	0	20
Rice husk biochar	level 1	1.5 g/25 mL	1.5g/200 g dry soil	20
	level 2	3 g/25 mL	3g/200 g dry soil	20
Food waste biochar	level 1	1.5 g/25 mL	1.5g/200 g dry soil	20
	level 2	3 g/25 mL	3g/200 g dry soil	20



2000). 바이오차 비료성분 분석 및 중금속함량은 비료의 품질검사 및 시료채취 기준 (RDA, 2010)의 방법을 따랐으며 5회 채취 분석하여 성분의 균일성을 살펴보았다.

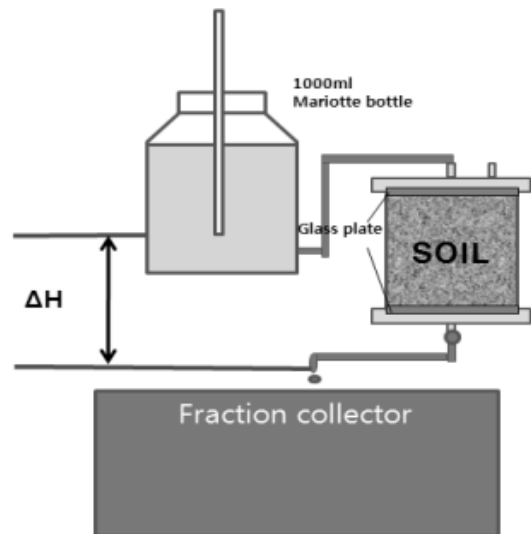
**2. 발아시험**

발아시험은 Table 2와 같이 증류수배지와 토양배지에서 각각 바이오차를 무처리 및 1배, 2배로 3반복으로 처리하였다. 이 때 1배 처리량은 채취포장의 표토 10 cm에 처리할 시 (용적밀도 1.3 Mg m<sup>-3</sup>) 10 MT ha<sup>-1</sup>에 해당하였다. 증류수배지는 petri dish를 사용하였고 토양은 500 mL 비이커를 사용하였다. 처리된 각 용기에 적상추(*Lactuca sativa* L.) 종자 20개를 파종하고 25°C 항온기에서 10일간 발아율을 관찰하였다. 10일 후 증류수 배지의 pH와 EC를 측정하였고 토양배지는 pH, EC, 토양유기탄소함량을 측정하였다. 측정방법은 토양 및 식물체 분석법(NIAST, 2000)의 방법을 따랐으며 pH (H<sub>2</sub>O, 1:5)는 pH meter (Orion, USA)로 측정하였고 EC는 EC meter (EcoScan, Japan)로 측정하였다. 토양유기탄소함량은 건조토양을 막자로 잘 간 후 원소분석기(LECO1000, US)를 이용하여 측정하였다.

**3. 컬럼시험**

컬럼은 3인치코아(Φ75 x h75 mm)를 사용하였고, 풍건 토양 약 350 g에 RHB와 FWB를 10 MT ha<sup>-1</sup>에 해당하는

양을 처리한 후 컬럼에 충전하였다. 충전 후 컬럼을 가득 채우지 못할 경우 토양을 추가하였다. 충전 후 토양을 물로 포화시킨 후 10 kPa 수준에서 배수시켰다. 배수 후 토양이 안정화 될 수 있도록 3-5일 정도의 시간을 둔 후 Fig. 1의 장치에 장착하였다. 컬럼을 아래에서 천천히 포화시킨 후 0.005 M SrBr<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O (EC-1 dS m<sup>-1</sup>)를 Mariotte bottle을 이용하여 일정수두를 유지하면서 계속 흘려주었다. 이 때 유출되는 용액을 분획수집기를 이용하여 약 15 mL 씩 분획수집하여 유출액 중 총유기탄소(Total Organic Carbon, TOC)를 TOC 분석기(GE Sievers, US)를 이용하여 분석하



**Fig. 1.** Schematic diagram of column experiment; ΔH : hydraulic gradient of soil water potential.

였다. 컬럼 시험동안 정수위를 유지하였으며 포화 컬럼의 수리전도도( $K_{25}$ )는 다음의 식으로 계산하였다(NIAST, 2000).

$$K_{25} = Q \times \frac{L}{A \Delta H} \times \frac{\eta t}{\eta_{25}} \quad (\text{식 1})$$

Q : 투수량( $\text{cm}^3/\text{hr}$ )

L : Core 길이(cm)

A : Core의 내단면적( $\text{cm}^2$ )

$\Delta H$  : 수두차(cm)

$\eta_t$  :  $t^\circ\text{C}$ 에서의 물의 점성계수(Centipoise)

$\eta_{25}$  :  $25^\circ\text{C}$  표준상태에서의 물의 점성계수(Centipoise)

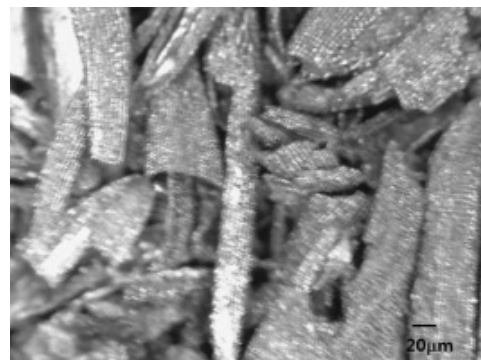
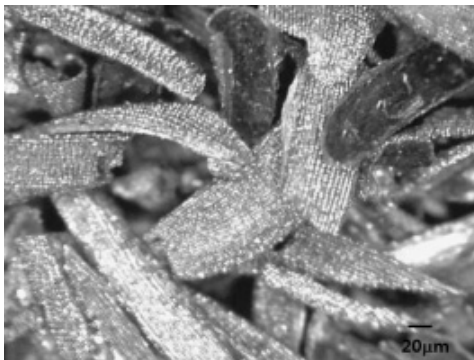
### III. 결과 및 고찰

우리나라에서 RHB와 FWB는 무산소상태에서  $400^\circ\text{C}$  이상의 고열을 가해 탄화시켜 얻고 있다. Fig. 2는 RHB와 FWB의 50배 확대 이미지이다. FWB의 경우 탄화 후 압착 과정을 거친 상태로 RHB보다 딱딱한 성상을 보였다. Table 3은 바이오차 주성분함량을 나타내고 있다. RHB이 FWB보다 탄소 및 질소함량이 낮게 나타났고 탄소와 질소의 비는

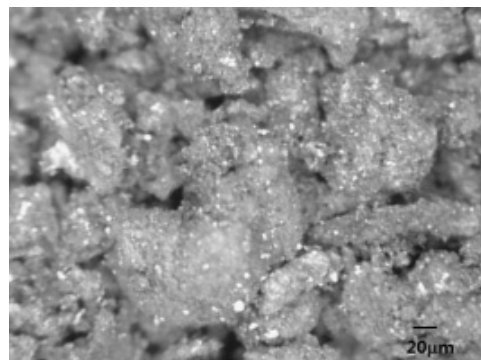
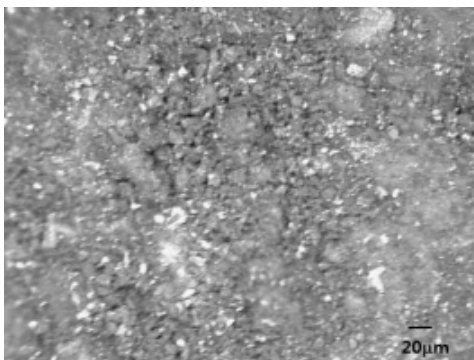
**Table 3.** Total element contents of rice husk and food waste biochars used.

Biochar		C	N	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{K}_2\text{O}$	Salt
Rice husk biochar	Mean (%)	19.21	0.60	0.20	2.06	0.06
	SD <sup>‡</sup>	2.0	0.12	0	0.02	0.01
	CV <sup>§</sup> (%)	10	21	0	1	19
Food waste biochar	Mean (%)	27.78	2.68	7.24	3.13	8.69
	SD	2.25	0.09	0.20	0.26	0.58
	CV (%)	8	3	3	8	7

<sup>‡</sup>Standard deviation; <sup>§</sup>Coefficient of variation.



(a) Rice husk biochar



(b) Food waste biochar

**Fig. 2.** The image capture (x50) of rice husk biochar (a) and food waste biochar (b).

**Table 4.** Heavy metal content of rice husk and food waste biochars used.

Biochar		As	Cd	Hg	Pb	Cr	Cu	Zn	Ni
		----- mg kg <sup>-1</sup> -----							
Rice husk biochar	Mean	trace <sup>†</sup>	trace	0.08	trace	trace	12.1	46.2	trace
	SD <sup>‡</sup>	-	-	0.01	-	-	1.39	1.43	-
	CV <sup>§</sup> (%)	-	-	0.1	-	-	11	3	-
Food waste biochar	Mean	trace	trace	trace	13.4	123.2	235.1	499.0	315.1
	SD	-	-	-	1.63	7.06	111.47	35.78	26.17
	CV (%)	-	-	-	12	6	47	7	8

<sup>†</sup>Lower than detected limit (0.05 mg kg<sup>-1</sup>); <sup>‡</sup>Standard deviation; <sup>§</sup>Coefficient of variation.

**Table 5.** 1N ammonium acetate extractable cation and cation exchange capacity of biochars used.

Biochar	1 M NH <sub>4</sub> OAC extractable cation				CEC <sup>†</sup>
	Ca	K	Mg	Na	
----- cmolc kg <sup>-1</sup> -----					
Rice husk biochar	5.0	36.7	1.4	1.5	39.6
Food waste biochar	30.1	59.1	5.0	116.0	28.8

<sup>†</sup>Cation exchange capacity.

**Table 6.** Germination rate of lettuce seeds as affected by biochar application.

Treatment	Germination rate in distilled water			Germination rate in soil		
	5day	7day	10day	2day	4day	10day
----- % -----						
Control	72±13*	85±13	85±13	58±23	83±13	85±15
Rice husk biochar	level 1	52±16	58±16	58±16	80±10	87±6
	level 2	70±25	70±25	70±25	70±22	85±10
Food waste biochar	level 1	0	0	0	22±25	53±23
	level 2	0	0	0	0	12±6

\*Mean ± standard deviation.

RHB이 32로 FWB보다 약 두 배 높게 나타났다. 인산과 칼리 또한 FWB가 높게 나타났다. FWB의 염분함량은 평균 9%로 퇴비규격 1%를 훨씬 초과하였다. 반면 RHB의 경우 1%미만으로 낮게 나타났다. 중금속 함량 또한 수은을 제외하고 FWB에서 높게 나타났다. 니켈의 경우 부산물비료 허용량 50 mg kg<sup>-1</sup>을 크게 초과하였으며 구리의 경우도 평균 값은 허용량 이하였으나 허용량을 초과하는 시료가 존재하였다. 크롬 및 아연 또한 허용량 이하지만 100 mg kg<sup>-1</sup>이상으로 나타났다. 1 M NH<sub>4</sub>OAC 추출 양이온 또한 FWB에서 높게 나타났으며 특히 나트륨함량이 100 cmolc kg<sup>-1</sup>이상으로 매우 높게 나타났다. 반면 양이온 교환용량은 RHB에서 더 높게 나타났다. 바이오차의 특성을 볼 때 FWB는 염분

및 중금속성분함량이 허용량을 초과하여 농경지 시용에 한계가 있다고 볼 수 있다. 그러나 토양처리시 유기탄소 증진 및 식물생육에 미치는 영향을 RHB와 비교하여 평가해 보는 것은 앞으로 다양한 유기성 폐기물의 자원화 측면에서 유용하다 할 수 있다.

바이오차 처리에 따른 상추종자의 발아율은 Table 6에 나타나 있다. 증류수배지에서 발아율은 무처리에서 5일째 평균 72%, 7일째 85%로 나타났으며 표준편차가 13%로 발아 변이계수가 15%정도로 나타났다. 토양배지에서도 무처리 10일째 평균 85%로 증류수 배지와 유사하게 나타났다. RHB 처리구에서 발아율 10일째에 평균 58%~70%로 증류수배지에서 무처리보다 낮았으며 1배구보다 2배구가 높게

**Table 7.** Physico-chemical properties of lettuce seeds growth media as affected by biochar application.

Treatment	in distilled water		in soil		
	pH (1:5)	EC dS m <sup>-1</sup>	pH (1:5)	EC dS m <sup>-1</sup>	SOC <sup>†</sup> g kg <sup>-1</sup>
Control	7.25±0.02*	0.02±0.00	6.48±0.08	0.66±0.03	9.2±0.3
Rice husk biochar	level 1 8.24±0.63	0.63±0.00	6.59±0.02	0.65±0.03	12.1±0.3
level 2	8.78±0.27	1.08±0.12	6.67±0.03	0.72±0.04	14.6±0.4
Food waste biochar	level 1 9.42±0.17	9.15±1.84	6.84±0.03	2.23±0.09	11.1±0.8
level 2	9.76±0.15	15.72±1.44	7.20±0.09	4.81±0.40	12.8±0.4

\*Mean ± standard deviation; †Soil organic carbon.

**Table 8.** Porosity and saturated hydraulic conductivity of columns as affected by biochar application.

Soil column	Bulk density Mg m <sup>-3</sup>	Total porosity %	Average saturated hydraulic conductivity cm hr <sup>-1</sup>
Control	1.3	52	0.20±0.03*
Rice husk biochar	1.2	54	0.51±0.03
Food waste biochar	1.3	52	0.25±0.02

\*Mean ± standard deviation.

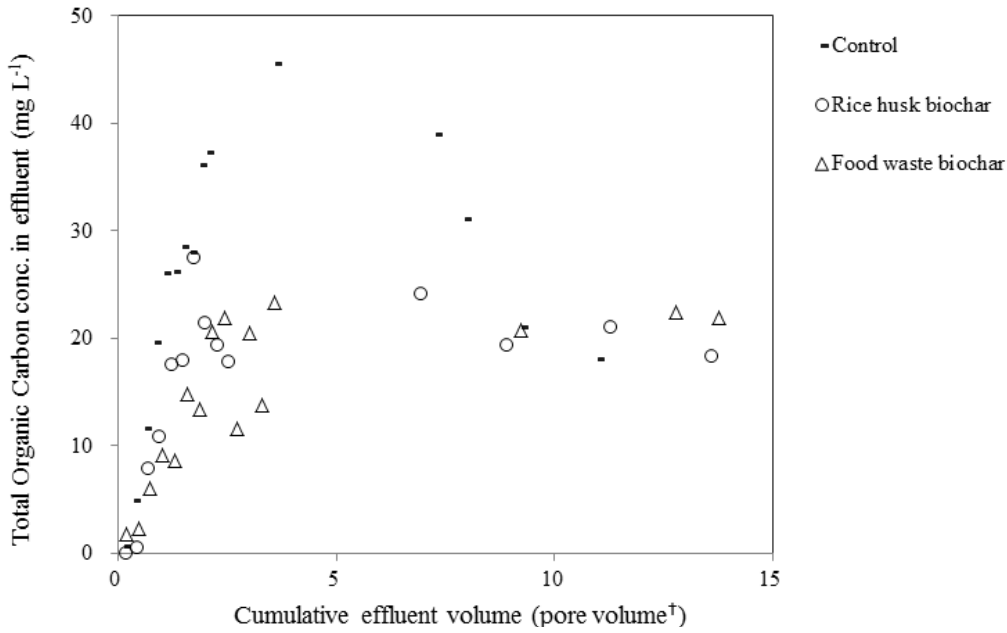
나타났으나 유의한 차이는 보이지 않았다. 반면 FWB에서는 상추종자가 발아되지 않았다. Table 7에서 항온배양 후 증류수 배지를 조사한 결과를 보면, FWB 처리구의 pH가 9를 넘고 EC 또한 9-15 dS m<sup>-1</sup>로 매우 높게 나타나고 있다. Table 3에서 FWB의 염분함량은 평균 8%로 퇴비규격 1%이하에 비하여 매우 높은 값을 나타내고 있다. 상추는 FAO(1985)에서 작물의 내염성 정도를 참조해보면 1.3 dS m<sup>-1</sup>의 임계값을 갖는 염해에 약한 작물이다. 따라서 FWB 처리는 상추와 같이 염해에 약한 작물에 피해를 줄 수 있다고 판단할 수 있었다.

토양배지의 경우, 증류수 배지에 비해 FWB 처리구에서도 10일째 57%~70%정도의 발아율을 나타내었으며 RHB 처리의 경우 무처리와 유사한 수준으로 발아율이 높았다. 이는 상대적으로 증류수배지에서보다 토양에서 바이오차 처리율이 낮고 토양이 갖는 완충능력 때문으로 사료된다. 그럼에도 2일째 발아율은 무처리와 RHB에 비해 FWB의 발아율이 현격하게 낮아 염해의 영향이 바이오차 사용 초기에 크게 나타날 수 있음을 알 수 있었다. 토양배지에서 10일 후 pH가 6.5-7.2, EC가 0.7-4.8 dS m<sup>-1</sup>로 범위로 나타났다(Table 7). RHB 처리에서 pH는 무처리에 비해 약 0.1-0.2정도 증가하였으나 EC는 1배구에서는 무처리와 거의 유사하였고 2배구에서 약 0.7 dS m<sup>-1</sup>로 약간 높았다. 반면 FWB 처리구는 pH 0.3-0.7, EC는 1.5-4.1 dS m<sup>-1</sup>

무처리에 비해 높게 나타났다. 따라서 바이오차의 특성에 따라 처리 후의 토양 특성이 크게 좌우됨을 알 수 있었다. 토양유기탄소함량의 경우, 무처리에 비해 바이오차 처리구가 높았으며 동일수준 처리 시 RHB가 FWB보다 더 높게 나타났다.

바이오차 사용 토양 컬럼에서 물로 유출되는 유기탄소량을 알아보기 위해 시험에 사용된 컬럼의 물리적 특성은 Table 8에 나타나 있다. 무처리에 비해 RHB를 처리한 컬럼이 무처리의 두 배 이상의 포화수리전도도를 나타내었으며 공극률 또한 무처리에 비해 높게 나타났다. 따라서 RHB 처리로 물의 이동에 주로 관여하는 대공극량이 증가한 것으로 판단할 수 있었다. 대공극량의 증가는 포화수리전도도를 높일 뿐 아니라 통기성 또한 높여 토양 물리성을 개선할 수 있다. 반면 FWB 처리 토양은 무처리와 유사한 수리전도도를 나타내었다. 공극률 또한 무처리와 유사하였는데, 이는 탄화 후 압착 과정을 거쳐 밀도가 RHB에 비해 높기 때문으로 판단할 수 있었다.

바이오차 사용 토양 컬럼에서 유출액 중 TOC 농도의 그래프가 Fig. 3에 나타나 있으며 0-15 pore volume까지 조사하였다. 초기 0-2 pore volume의 유출액 중 TOC 농도는 무처리에서 급격히 증가하는 경향을 나타내었고 무처리에서 약 4 pore volume에서 최고점을 나타내었다. RHB 처리 컬럼은 약 2 pore volume에서 최고점을 나타내고 점



**Fig. 3.** Total organic carbon (TOC) of column effluent as affected by rice husk and food waste biochars application; † equivalent to porosity, for example, 1 pore volume of 300 mL soil with porosity 50% is 150 mL.

점 감소되는 경향을 나타내었다. FWB 에서 유출액 초기에 TOC 농도가 증가되는 기울기가 가장 완만하였고 약 4 pore volume에서 최고점을 나타내었다. 최고점에서 TOC 농도는 무처리에서 45 mg L<sup>-1</sup>로 RHB와 FWB의 약 두 배를 나타내었다. 즉 바이오 차 처리구에서 유기탄소 용출이 무처리에 비해 낮게 나타났었다. 이는 시험토양에 비해 양이온치 환용량이 높은 RHB와 FWB의 처리로 토양의 흡착능력이 증가되었기 때문으로 판단할 수 있었다. Kaiser 등(2001)은 수용성 유기 양분의 손실은 토양 중 수용성 유기물질의 이동성에 따른다고 보고하였으며 Bolan 등(2004)은 점토 및 수산화물과 같은 흡착체 함량이 낮은 토양에서 수용성 유기물질의 흡착이 낮게 나타났다고 보고하였다. 따라서 시험토양과 같이 점토함량이 낮은 사양질 토양에서 바이오 차 처리로 증가된 흡착력은 수용성 유기물질의 이동성을 낮추어 지하수로 질소, 인 등의 영양물질 부하가 저감될 수 있을 것으로 사료된다.

한편 유출액 누적부피 9 pore volumes 이상에서는 무처리와 RHB와 FWB의 처리 컬럼 유출액의 유기탄소농도가 거의 유사하게 나타났으며 TOC 농도는 약 20 mg L<sup>-1</sup> 수준이었다. 이는 RHB와 FWB의 처리 컬럼에서 토양 중 수용성 유기물질을 바이오차가 흡착함과 동시에 처리한 바이오차에서 유기물질이 물로 용출될 수 있기 때문으로 생각된다 (Nguyen et al., 2008; Major et al., 2009). 특히 FWB의

경우 인의 함량이 높아 유기탄소 용탈과 함께 인도 용탈될 수 있어 하천 등 수계와 인접한 농경지에서 바이오차 사용 시 성분함량에 대한 조사가 필수적이라 할 수 있다.

요컨대, 부산물인 왕겨와 음식물쓰레기를 이용하여 생산된 두 종류의 바이오차를 밭 사양토에 10 MT ha<sup>-1</sup> 수준으로 처리한 결과 토양유기탄소함량이 증가하고 컬럼에서 유출되는 초기 유기탄소량이 작아져 바이오차 처리로 높아진 토양의 흡착능을 확인할 수 있었다. 그러나 음식물쓰레기 바이오차의 경우 높은 염 함량으로 토양 처리 시 작물의 발아율 저하가 나타났다. 이는 각종 부산물을 활용한 바이오차를 농업적으로 활용하기 위해서는 먼저 작물이나 토양 및 수계 등 주변 환경에 유해한 요소가 있는지를 확인할 필요가 있다는 것을 보여주는 사례라 하겠다. 반면 왕겨 바이오차의 경우 유기탄소량 증가 외에도 포화수리전도도의 증가 등의 토양 물리성 개선 효과를 함께 보여주었다.

#### IV. 결론

본 연구에서는 바이오차의 토양 처리시 행동특성을 구명하기 위해 국내 생산된 왕겨 바이오차와 음식물쓰레기 바이오차에 대해 물리화학적 특성을 조사하고 항온조건에서 상추발아시험, 토양 컬럼 시험을 수행하였다. 시험토양은 점토함량이 6%로 낮은 세사양토였고 바이오차 처리수준은

10 MT ha<sup>-1</sup>였다. 왕겨 바이오차와 음식물쓰레기 바이오차는 탄소와 질소의 함량비에서 큰 차이를 보였는데 왕겨 바이오차가 32로 음식물쓰레기 바이오차에 비해 약 두배 높게 나타났다. 음식물쓰레기 바이오차는 염분함량이 퇴비규격 1%를 초과하였고 중금속함량도 왕겨 바이오차에 비해 높게 나타났으며 반복 간 변이도 크게 나타났다. 상추밭아 시험 결과 왕겨 바이오차 처리구의 경우 무처리와 유사한 밭아울을 나타낸 반면 음식물쓰레기 바이오차는 밭아울이 무처리에 비해 낮게 나타났으며 밭아초기에 특히 뚜렷하였다. 이는 음식물쓰레기 바이오차 처리구의 높은 EC때문으로 판단되었다. 포화 토양 컬럼(Φ75 × h75 mm)시험에서 왕겨 바이오차 처리에서 투수속도가 무처리 및 음식물쓰레기 바이오차에 비해 높게 나타났다. 유출액 중 총유기탄소 농도 최고점은 왕겨 바이오차 처리에서 공극부피 2, 무처리와 음식물쓰레기 바이오차 처리에서 공극부피 4에서 나타났으며 이는 투수속도 및 공극률의 차이에 의한 것으로 판되었다. 최고점에서의 총 유기탄소 농도는 왕겨 및 음식물쓰레기 바이오차 처리에서 무처리보다 낮게 나타났다. 이는 바이오차 처리로 수용성유기탄소 용출이 저감될 수 있음을 보여준다 하겠다. 반면 유출액이 공극부피 9 이상 누적된 후에는 처리 간 농도가 유사하게 나타났다. 따라서 밭 사양토에 왕겨 및 음식물쓰레기 등 부산물을 원료로 제조한 바이오차 처리로 토양유기탄소함량이 증가하여 수용성유기탄소 용출 등의 완충기능이 강화될 수 있는 반면 원료자체에 포함된 염 및 중금속은 바이오차의 농업적 사용을 제한할 수 있다고 판단할 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 국립농업과학원 기관고유사업(PJ010120)의 지원에 의해 수행되었습니다.

## 참고 문헌

Bolan NS, Adriano DC, De-la-Luz M. 2004. Dynamics and environmental significance of dissolved organic matter in soil. SuperSoil 2004: 3<sup>rd</sup> Australian New Zealand Soils Conference, 5-9 December 2004, University of Sydney, Australia.

Butnan S, Deenik JL, Toomsan B, Antal MJ, Viyakon. 2015. Biochar characteristics and application rates affecting corn growth and properties of soils contrasting in texture and

mineralogy. Geoderma 237-238:105-116.

Cao J, Tao S, Li BG. 1999. Leaching kinetics of water soiluble organic carbon from upland soil. Chemosphere 39(11): 1771-1780.

FAO. 1985. Crop salt tolerance data.

Gaskin JW, Speir RA, Harris K, Das KC, Dewey R, Morris LA, Fisher DS. 2010. Effect of peanut hull and pine chip biochar on soil nutrients, corn nutrient status, and yield. Agronomy Journal 102(2):623-633.

Ghosh U, Gilette JS, Luthy RG, Zare RN. 2000. Microscale location, characterization, and association of polycyclic aromatic hydrocarbons on harbor sediment particles. EEnvironmental Science & Technology 34:1729-1736.

Glaser B, Haumaier L, Guggenberger G, Zech W. 2001. The "Terra Preta" phenomenon: A model for sustainable agriculture in the humid tropics. Naturwissenschaften 88:37-41.

Hossain MK, Strezov V, Chan KY, Nelson PF. 2010. Agronomic properties of wastewater sludge biochar and bioavailability of metals in production of cherrytomato (*Lycopersicon esculentum*). Chemosphere 78:1167-1171.

Jeong SJ, Oh JS, Seok WY, Cho MY. 2008. The effect of treatment of woody charred materials on the growth and components of tomato and Chinese cabbage. Korean Journal of organic agriculture 16(4):455-469.

Kaiser K, Guggenberger G, Zech W. 2001. Organically bound nutrients in dissolved organic matter fractions in seepage and pore water of weakly developed forest soils. Acta Hydrochimica et Hydrobiologica 28:411-419.

Lehmann J, da Silva JP, Steiner C, Nehls T, Zech W, Glaser B. 2003. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the central Amazon basin: Fertilizer, manure and charcoal amendments. Plant Soil 249: 343-357.

Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. 2006. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems - a review. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 11, 403-427. DOI: 10.1007/s11027-005-9006-5. 2.6 NACP, Greenbelt, MD.

Liang B, Lehmann J, Solomon D, Kinyangi J, Grossman J, O'Neill B, Skjemstad O, Thies J, Luizao FJ, Petersen J, Neves EG. 2006. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. Soil Science Society of America Journal 70:1719-1730.

Major J, Lehmann J, Rondon M, Goodale C. 2009. Fate of soil-applied black carbon: downward migration, leaching and soil respiration. Global Change Biology.

Nguyen BT, Lehmann J, Kinyangi J, Smernik R, Riha SJ, Engelhard MH. 2008. Long-term black carbon dynamics in cultivated soil. Biogeochemistry 89:295-308.

NIAST. 2000. The method of soil and plant analysis.

RDA. 2010. The guideline for quality test and sampling of fertilizer.

Schmidt MWI, Noack AG. 2000. Black carbon in soils and sediments: Analysis, distribution, implications, and current challenges. Global Biogeochemical Cycles 14:777-793.



Singh BP, Cowie AL. 2008. Decomposition of biochars in soil (vertisol) and their turnover time - an important factor affecting the greenhouse balance, Conference of the International Biochar Initiative - Biochar, Sustainability and Security in a Changing Climate, Newcastle, United Kingdom, September 8-10, 2008.

Yun BK, Park IJ, Yoo YK, Hou WN, Kim BW, Kim YW. 2004. The effect of application levels of wood charcoal powder on onion (*Allium cepa* L.) growth and soil physico-chemical properties. The Korean Journal of International Agriculture 16(2): 162-167.