

느타리버섯 수확후배지 바이오차 사용이 토양 이화학성 및 작물 생육에 미치는 영향

장재은^{at}, 임성희^b, 신민우^a, 문지영^a, 남주희^a, 임갑준^b

Effects of applied biochar derived from spent oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*) substrate to Soil Physico-chemical Properties and crop growth responses

Jae-Eun Jang^{at}, Sung-Hee Lim^b, Min-Woo Shin^a, Ji-Young Moon^a, Joo-Hee Nam^a, Gab-June Lim^b

(Received: Aug. 6, 2023 / Revised: Sep. 15, 2023 / Accepted: Sep. 15, 2023)

ABSTRACT: This study was conducted to investigate the effect of soil physico-chemical properties and crop growth responses for application of biochar derived from substrate with post harvest of oyster mushroom. The biochar was produced at 450~600°C using a top-light up draft gasifier (TLUD) production system. As a result of elemental analysis, the biochar used was C 76.2%, H 2.5%, N 3.2%, and H/C was 0.39, which met the international certification standards for biocarbons (IBI) below 0.7. The chemical properties were 10.1 for pH, 1.0% for P₂O₅, 1.8% for K₂O, and 2.5% for CaO. The application rates of biochar were 0, 100, 200, 300, and 500 kg/10a. For cultivation of chinese cabbage and welsh onion, soil organic matter (OM), total nitrogen (T-N), total carbon (T-C), Ex.cation K contents and cation exchange capacity (CEC) in the treatments were increased compared to the no treatment. In addition, the bulk density was lowered and the porosity was increased, improving the soil physical properties in the treated soil. The growth of chinese cabbage and green onion increased with the application of biochar, but the yields of chinese cabbage and green onion did not significantly different among the treatments. Soil carbon sequestration in the treatments enhanced with increasing the amount of biochar application. It is expected to apply the biochar derived from spent oyster mushroom substrate in the eco-friendly farm soil management, improving soil physico-chemical properties.

Keywords: Spent oyster mushroom substrate, Biochar, Soil physico-chemical properties, Chinese cabbage, Welsh onion

초 록: 본 연구는 느타리버섯 수확후배지를 이용하여 바이오차를 제조하고 바이오차 사용이 토양 이화학성과 작물 생육에 미치는 영향을 구명하기 위하여 수행되었다. 연구에 사용한 바이오차는 TLUD 연소생산시스템 사용하여 450~600°C에서 제조하고 바이오차의 성분을 조사하였다. 사용한 바이오차는 원소분석결과 C 76.2%, H 2.5%, N 3.2%로 H/C 비율이 0.39로 국제적인 바이오차의 분해 안전성 인증기준(IBI)인 0.7 이하로 나타났으며 pH는 10.1, P₂O₅ 1.0%, K₂O 1.8%, CaO 2.5%로 나타났다. 느타리버섯 수확후배지 바이오차를 사용량별로 처리하여 배추, 대파 포장시험 결과 바이오차를 사용하지않은 시험구와 비교하여 바이오차 사용으로 토양의 유기물(OM), 전질소(T-N), 전탄소(T-C), K 함량이 증가하고 치환성양이온교환용량(CEC)이 증가하였다. 또한 토양 물리성에 대한 영향을 조사한

^a 경기도농업기술원 친환경미생물연구소 연구사(Researcher, Department of Eco-Friendly microorganism Research Institute, Gyeonggi-do Agricultural Research and Extension Services)

^b 경기도농업기술원 친환경미생물연구소 연구관(Senior Researcher, Department of Eco-Friendly microorganism Research Institute, Gyeonggi-do Agricultural Research and Extension Services)

† Corresponding author(e-mail: jjel049@gg.go.kr)

결과 바이오차 시용으로 토양의 용적밀도가 낮아지고 공극률이 높아져 토양 물리성이 개선되는 효과가 나타났다. 바이오차 200 kg/10a 시용시 배추와 대파 생육이 양호하고 최대수량을 나타내었으나 통계적인 차이는 없었다. 바이오차 시용량이 증가할수록 토양 탄소함량이 증가하고 이에 따라 토양 탄소격리량도 증가하였다. 느타리버섯 수확후배지 바이오차를 토양개량제로 활용하면 토양의 이화학적 개선에 효과가 있어 친환경 농가에서 토양개량제로 활용도가 높을 것으로 생각되며 농업 부산물의 유기자원화를 통한 버섯 수확후배지의 소비처 확대에도 기여할 것으로 기대된다.

주제어: 느타리버섯 수확후배지, 바이오차, 토양 이화학적, 배추, 대파

1. 서론

경기도는 느타리버섯 주생산지로 전국 생산량 4만 5,724톤의 68.7%인 3만1,410톤(Ministry of agriculture, food and rural affairs, 2020)을 차지하고 있어 버섯 생산량의 5배에 해당하는 버섯 수확후배지가 발생한다는 보고를 근거로 산출하면 느타리버섯 수확후배지의 발생량이 연간 약 16만톤에 이른다.^{1),2),3)} 버섯 수확후배지는 목질분해효소, 다양한 대사 물질 등 산업적 유용 물질이 다량 잔존하여 저비용으로 고부가가치의 유용자원으로 전환시킬 수 있다.⁴⁾ 하지만 느타리버섯 수확후배지는 톱밥의 비중이 팽이버섯, 큰느타리버섯에 비해 상대적으로 높기 때문에 가축 사료로 활용되지 못하고 주로 퇴비 및 유기질 비료 원료의 일부로 사용되어 왔으며,^{5),6)} 최근에는 수요 대비 공급량이 많아 자원화 가치가 높은 느타리버섯 수확후배지의 자원화 확대를 위해서는 새로운 소비처 발굴 및 기존 소비처에 확대적용하는 활용방안에 대한 연구가 필요하다.

바이오차는 목재와 가축분뇨와 같은 산림과 농축산업 등에서 발생한 부산물 바이오매스를 산소가 제한된 환경에서 열분해를 통해 만들어진 물질이다. 전통적인 목탄은 주로 연료로 생산되었으나, 바이오차는 기후변화의 완화, 재생 에너지 생산, 토양개량 및 탄소격리 등 다양한 분야에서 이용 가능하다고 보고되어 있다.^{7),8),9),10)} 바이오차는 많은 공극량에 의한 넓은 표면적을 갖고 있어 토양의 보수성, 통기성 등 물리적 성질을 개량하고, pH 보정, 토양 내 양이온 및 음이온을 붙잡아 양분보유능력을 증가, 온실가스배출 저감 등의 다양한 효과가 있다고 알려져 있다.^{11),12),13),14)}

최근에는 바이오차의 토양개량 효과 및 탄소격리에 대한 연구에도 관심이 모아지고 있으며, 바이오차를 연용하면 작물 생산성 향상에도 효과가 있다고 보고되어 있다.^{15),16),17)} 바이오차의 농업적 활용은 토양의 물리적, 화학적, 생물학적 및 비옥도 특성의 변화를 일으켜 작물 성장을 증가시킬 수 있다고 알려져 있으며^{18),19),20)} 토양에 사용하면 토양개량효과 등의 이점이 있으나 재료 및 제조특성에 따라 효과가 다르다고 보고되어 있다.²¹⁾ 또한 바이오차의 적용은 토양 내 탄소를 격리시키고 H/C 비율이 국제적인 바이오차의 분해 안정성 인증(ABI) 기준 0.7 이하의 바이오차를 투입한 토양에서 탄소 함량이 증가함에도 상대적으로 무기화되는 비율은 낮게 나타나 바이오차는 기후 변화를 완화시킬 수 있는 방법 중 하나로 주목받고 있다.^{22),23),24)}

본 연구는 경기도내 발생하는 농업부산물 중 느타리버섯 수확후배지를 사용하여 바이오차를 제조하고 이를 이용한 토양 이화학적 개선 효과를 구명하여 친환경 토양관리기술을 개발하고 농업 부산물의 유기자원화를 통한 버섯 수확후배지의 소비처 확대에도 기여하고자 실시하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 바이오차 제조

경기도내 버섯 중 생산량이 가장 많은 느타리버섯 수확후배지를 이용하여 충남 예산에 있는 바이오차 제조공장 탄환로에서 상향 통풍형 열분해 방식(TLUD : Top-Lit Up Draft gasifier)으로 제조온도

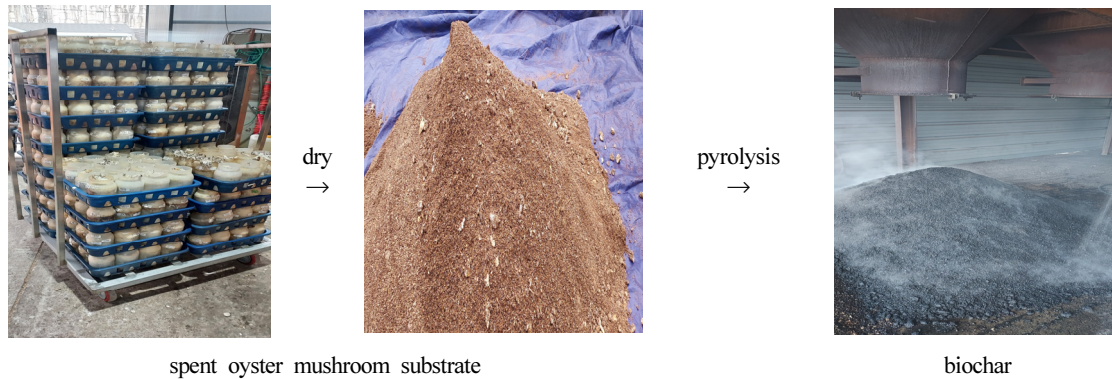


Fig. 1. The manufacturing procedure of spent oyster mushroom substrate biochar.

450-600°C에서 바이오차를 제조하여 성분을 조사하였다.²⁵⁾ TLUD 열분해 공정은 탄화로 상단에 있는 전기저항체를 통해 점화한 후, 하단에 있는 바이오매스 사이의 미세한 공극을 통해 공기가 유입되도록 하여 상층부터 탄화가 될 수 있도록 고안된 공정 방식을 통해 생산하여 본 연구에 사용하였다. 느타리버섯 재배에 사용한 배지는 미루나무톱밥 50%+비트펄프 30%+면실박 20%을 혼합하여 제조하였고, 버섯을 생산하고 발생한 수분 63.8%의 수확후배지를 수분 10% 이하로 자연건조후 실험에 사용하였다. 제조한 바이오차의 성분 비교를 위해서 시판되고 있는 왕겨 바이오차를 사용하였다.

2.2. 바이오차 처리 및 시험작물 재배

바이오차의 작물에 대한 시용효과 시험은 경기도 광주시 경기도농업기술원 친환경미생물연구소내 비닐하우스에서 수행하였다. 작물 정식전 토양검정을 실시하여 질소 시비량을 산출하여 해당하는 유기질 비료를 모든 처리구에 동일하게 투입하였다. 바이오차는 작물을 정식하기 2주전에 시용량별로 토양에 처리하고 혼합한 후 배추를 정식하였다. 시험구는 무시용, 느타리버섯 수확후배지 바이오차 100, 200, 300, 500 kg/10a 시용 등 총 5처리를 난괴법 3반복으로 배치하여 토양 화학성 및 물리성, 작물생육 및 수량 등을 조사하여 바이오차의 시용효과를 조사하였다. 대파도 비닐하우스에서 배추와 동일한 방식으로 바이오차 처리후 정식하여 바이오차 시용효과를 조사하였다. 배추는 2023년 4월 3일 정식하려 2개월 재배

하고 수확하면서 생육 및 생체중을 조사하였으며 대파는 2022년 11월 10일에 정식하여 2023년 3월 30일 수확하였으며 작물 생육 및 수량 등을 조사하였다. 생육 및 수량조사는 농촌진흥청의 농업과학기술 연구조사분석기준²⁶⁾에 준하여 실시하였다.

2.3. 토양 및 식물체 분석

토양은 작물 수확후 시험구별로 표토 15 cm를 채취 후 풍건하여 2 mm 체를 통과시켜 분석하였다. 토양 이화학성 및 식물체 분석은 농촌진흥청의 토양 및 식물체 분석법²⁷⁾에 준하였다. 토양 pH와 EC는 5배량의 물로 추출하여 초자전극법에 의하여 pH meter (Star A211, Orion, USA)와 EC meter (HI 9932, Hanna, Korea)로 각각 측정하였으며, 바이오차의 pH와 EC는 10배량의 물로 추출하여 측정하였다. 토양의 질소는 Kjeldahl 증류법, 유기물은 Tyurin법, 유효인산은 Lancaster법으로 분석하였다. 치환성 양이온은 1N-NH₄OAC (pH 7.0) 완충용액으로 추출하여 ICP (GBC Integra XL, Australia)를 이용하여 분석하였다. 바이오차는 H₂SO₄-HClO₄로 습식분해하여 인산은 Vanadate법, 치환성 양이온은 ICP (GBC Integra XL, Australia)를 이용하여 분석하였다. 원소분석기(Flash EA 1112, Thermo, USA)를 이용하여 탄소, 수소, 산소, 질소, 황의 함량을 측정하였으며, 각 원소의 함량에 기초하여 방향성 및 극성의 정도를 유추할 수 있는 H/C 비율을 산출하였다. 토양 물리성인 용적밀도와 공극률은 2인치 코어로 토양을 채취하여 건습토의 차이에 따라 정량하였다. 바이오차 시용량에 따른

토양 탄소 격리량은 Eq. 1을 이용하여 무처리구와 바이오차를 처리한구 사이의 토양 탄소의 차이에 의해서 산출하였다.

$$SS_{TC} = (T_{TCi} - NT_{TCi}) \times SW \quad (\text{Eq. 1.})$$

SS_{TC} 는 토양의 탄소격리(kg/10a), T는 바이오차 처리구, NT는 대조구, i는 시료 채취 시기, TC는 토양 탄소 함량(g/kg), SW는 토양 비중을 고려한 작토층의 토양 무게(kg/10a)를 말한다.

2.4. 통계처리

측정 결과에 대한 통계분석은 SAS 9.2 (Statistical Analysis System Institute Inc.) package를 이용하여 분석하였으며, Duncan's multiple range test (DMRT) 방법으로 $p < 0.05$ 수준에서 유의성을 검정하여 상호 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 바이오차 성분특성

느타리버섯 수확후배지의 성분은 Table 1과 같이 전질소(T-N) 1.5%, 유기물(OM) 68%, P_2O_5 0.4%, K_2O 0.7%이었고 현물 상태에서 수분 63.8%의 수확후배지를 자연건조시켜 수분함량 8.2%으로 낮추어 사용하였다. 바이오차 제조를 위해 TLUD 방식을 이용하여 1.5루베 회화로를 이용하여 제조온도 450~600°C, 가열시간 4시간으로 바이오차를 제조하여 성분조사한 결과는 Table 2와 같다. 실험에 사용한 느타리버섯 수확후배지 바이오차 특성을 비교를 위해 TLUD 방식으로 제조되어 시판되고 있는 기존 왕겨 바이오차를 사용하였다. 느타리버섯 수확후배지를 바이오차로 제조하면 pH는 10.1로 높아지고 P_2O_5 1.0%, K_2O 1.8%, CaO 2.5%로 증가하였으며 회분 함량이 9.6%로 나타났다. 대조로 사용한 왕겨 바이오차에 비해 P_2O_5 , K_2O , CaO 함량이 높고 EC가 높게 나타났다. 바이오차 생산수율의 제한요인으로 작용하는

Table 1. The Chemical Properties of Spent Oyster Mushroom Substrate

Materials	pH	OM	T-N	P_2O_5	K_2O	CaO	MgO	Na_2O	Moisture contents
	(1:5) %							
spent mushroom substrate (SMS)	5.4	68	1.5	0.4	0.7	1.0	0.4	0.1	8.2

Table 2. The Change of Chemical Properties of Biochar by Manufacturing Method

Materials	pH	EC	P_2O_5	K_2O	CaO	MgO	Na_2O	CEC	Ash
	(1:10)	(dS/m)	..... % .....					(cmol/kg)	%
Rice hull biochar	9.7	2.3	0.3	1.2	0.3	0.1	0.1	5.7	26.9
SMS [†] biochar	10.1	13.8	1.0	1.8	2.5	1.1	0.1	22.9	9.6

[†]SMS, spent mushroom substrate.

Table 3. The Chemical Properties of Biochar Derived from Spent Mushroom Substrate

Materials	C	H	N	S	H/C
 %				
Rice hull biochar	64.3	2.6	0.9	0.1	0.49
SMS [†] biochar	76.2	2.5	3.2	0.3	0.39

[†]SMS, spent mushroom substrate.

회분함량도 9.6%로 왕겨 바이오차 26.9%에 비해 월등히 낮게 나타나 느타리버섯 수확후배지를 사용하면 기존 왕겨 바이오차에 비해 바이오차 생산수율을 높일 수 있을 것으로 생각되었다. 원소분석기(LECO Co. USA)를 이용하여 바이오차 성분을 분석한 결과는 Table 3과 같으며 C 76.2%, H 2.5%, N 3.2%, S 0.3%이었으며 H/C 비율이 0.39로 국제적인 바이오차의 분해 안정성 인증(IBI) 기준인 0.7 이하로 나타났다. 느타리버섯 수확후배지 바이오차는 왕겨 바이오차에 비해 C, N 함량이 높게 나타났는데 이는 느타리버섯 수확후배지는 다른 버섯 수확후배지보다 톱밥 함량이 높아서 기존 목질계 바이오차와 유사하게 C 함량이 높게 나타난 것으로 생각되며, 따라서 토양에 투입하였을 경우 토양 탄소격리에 더욱 효과적일 것이라 생각된다.

3.2. 바이오차 시용에 의한 토양 이화학성 변화
 바이오차의 작물에 대한 시용효과를 구명하기 위해 배추와 대파를 재배하면서 토양 화학성 및 물리성을 조사하였다. 바이오차를 무시용, 바이오차 100, 200, 300, 500 kg/10a 등 시용량별로 처리한 후 배추를 재배하면서 바이오차의 시용효과를 조사하였고 (Table 4). 대파를 시설재배하면서 배추와 동일한 방식으로 바이오차의 시용효과를 조사한 결과는 Table 5와 같다. 배추 재배시 바이오차 시용으로 토양 EC가 무시용 0.6 대비 바이오차 500 kg/10a 시용시 1.4까지 증가하였고, 유기물 함량은 바이오차 500 kg/10a 시용시 9.5 g/kg로 28.4% 증가하였으며, 유효인산 함량은 바이오차 500 kg/10a 시용시 259 mg/kg로 22.7% 증가하였다. 또한 전질소(T-N) 함량은 무시용 0.04%에 비교하여 0.07%까지 75% 증가하였으며, 전탄소(T-C) 함량은 무시용 0.46%에서 0.95%까지 107% 증가하였고, 치환성 양이온 K, Ca, Mg 함량도 증가되

Table 4. Chemical Properties of Soil by Biochar Application in Chinese Cabbage Cultivation

Treatments	pH	EC	OM	Av.P ₂ O ₅	T-N	T-C	Ex.cation			
							K	Ca	Mg	CEC
kg/10a	(1:5)	dS/m	g/kg	mg/kg	..... % .....	.....	..... cmol/kg			
No treatment	7.4ns [‡]	0.6ns	7.4b	211ns	0.04b	0.46b	0.31b	5.1ns	1.9ns	8.6b
SMS BC [†] 100	7.4	1.3	8.9ab	217	0.05ab	0.59b	0.31b	5.7	2.1	8.5b
SMS BC 200	7.5	1.1	8.9ab	222	0.05ab	0.66ab	0.31b	5.7	1.9	8.9ab
SMS BC 300	7.5	1.2	8.9ab	244	0.05ab	0.71ab	0.34b	5.9	2.1	9.1ab
SMS BC 500	7.5	1.4	9.5a	259	0.07a	0.95a	0.59a	5.8	2.2	9.6a

[†]SMS BC, spent mushroom substrate biochar.

[‡]Numbers with the same letter within a column are not significantly differed (Duncan's test, p < 0.05).

Table 5. Chemical Properties of Soil by Biochar Application in Welsh Onion Cultivation

Treatments	pH	EC	OM	Av.P ₂ O ₅	T-N	T-C	Ex.cation			
							K	Ca	Mg	CEC
kg/10a	(1:5)	dS/m	g/kg	mg/kg	..... % .....	.....	..... cmol/kg			
No treatment	7.3ns [‡]	0.4ns	7.7c	245ns	0.04c	0.53c	0.52ns	5.2ns	2.2ns	8.9ns
SMS BC [†] 100	7.5	0.7	9.7bc	256	0.05b	0.65c	0.54	5.5	2.3	8.9
SMS BC 200	7.4	0.5	12.0b	268	0.05b	0.70bc	0.55	5.9	2.4	9.4
SMS BC 300	7.5	0.9	12.8b	265	0.07a	0.87ab	0.55	5.7	2.2	10.3
SMS BC 500	7.7	1.1	18.3a	271	0.07a	1.04a	0.58	5.6	2.1	9.2

[†]SMS BC, spent mushroom substrate biochar.

[‡]Numbers with the same letter within a column are not significantly differed (Duncan's test, p < 0.05).

어 토양의 양이온치환용량(CEC)이 8.6 cmol/kg에서 9.6 cmol/kg으로 11.6% 증가하였다. 이는 느타리버섯 수확후배지 바이오차의 K, Ca, Mg 함량이 높아서 사용량이 증가할수록 토양의 양분함량을 증가시켰을 뿐만 아니라 바이오차가 갖고있는 많은 공극량에 의한 넓은 표면적이 토양내 양이온 및 음이온을 붙잡아 양분보유능력을 향상시키는 효과가 있다는 기존 보고와도 일치하였다.^{28),29)}

바이오차를 토양에 사용하고 대파를 재배하여 토양화학적 특성을 조사한 결과 무시용 대비 토양의 pH가 7.7까지 증가하였고, EC는 0.4에서 1.1까지 증가하였으며 바이오차 시용에 의해서 유기물은 바이오차 500 kg/10a 시용시 18.3 g/kg로 137.7%까지 증가하였다. 유효인산, T-N 함량도 바이오차 시용량이 증가할수록 높아졌으며, T-C 함량은 무시용 0.53%에서 바이오차 500 kg/10a 시용시 1.04%까지 96.2% 증가하여 배추 재배에서의 결과와 유사한 경향을 나타내었다. 바이오차 시용에 의한 토양화학적 변화는

토양 이화학적 특성 등 토양 조건 및 재배하는 작물에 따라서도 차이가 있을 것으로 생각되어 새로운 바이오차를 작물재배에 적용하기 위해서는 먼저 토양조건에 맞는 시용량 기준을 설정하는 것이 선행되어야 할 것으로 생각된다.

바이오차를 시용하고 배추와 대파를 재배한후 토양의 물리성을 조사한 결과는 Table 6과 같이 배추 재배시 바이오차 시용에 의해서 토양의 용적밀도가 1.32 g/cm까지 낮아졌으며, 이러한 경향은 대파 재배에서도 유사하게 나타났다. 또한 토양의 공극률은 배추와 대파 재배 토양에서 유사하게 무시용 대비 바이오차 시용으로 높아지는 경향이 있어 이러한 토양의 용적밀도와 공극률 변화를 볼 때 느타리버섯 수확후배지 바이오차 시용으로 토양 물리성이 개선되는 효과가 있음을 알 수 있었다.

바이오차 처리에 의한 토양 탄소격리량을 조사하기 위해서는 수식 1을 이용하였으며 바이오차 시용량 증가에 따른 토양 탄소격리량을 산출하면 Table 7

Table 6. Physical Properties of Soil after Biochar Application

Treatments	Cultivation of chinese cabbage		Cultivation of welsh onion	
	Bulk density	Porosity	Bulk density	Porosity
kg/10a	g/cm	%	g/cm	%
No treatment	1.44a [†]	45.5ns	1.64ns	38.0b
SMS BC [†] 100	1.34ab	49.4	1.55	41.6a
SMS BC 200	1.36ab	48.7	1.59	40.0ab
SMS BC 300	1.32b	50.2	1.60	39.5ab
SMS BC 500	1.37ab	48.3	1.59	40.0ab

[†]SMS BC, spent mushroom substrate biochar.

[‡]Numbers with the same letter within a column are not significantly differed (Duncan's test, $p < 0.05$).

Table 7. Evaluation of Carbon Sequestration to Different Application Rates of Biochar during Chinese Cabbage and Welsh Onion Cultivation

Treatments	Carbon sequestration	
	Chinese cabbage	Welsh onion
kg/10a	..... kg/10a	
SMS BC [†] 100	85b	78b
SMS BC 200	130b	111b
SMS BC 300	163ab	221ab
SMS BC 500	319a	332a
	$y = 0.0002x^2 + 0.5211x + 11.679$ ($R^2 = 0.9819$)	$y = -3E-05x^2 + 0.6823x + 0.2202$ ($R^2 = 0.9839$)

에서와 같이 배추 재배에서는 R² 값이 0.9819이었으며 대파 재배에서는 0.9839로 바이오차 시용량이 증가할수록 토양 탄소격리량이 증가하는 정의 상관관계가 있었다. 배추를 재배하면서 바이오차 시용량을 100 kg/10a에서 500 kg/10a으로 늘리면 토양의 탄소 격리량도 319 kg/10a까지 증가하였고 이러한 경향은 대파 재배에서도 동일하게 나타나 탄소 격리량이 332 kg/10a까지 증가하였다. 따라서 느타리버섯 수확후배지의 시용은 토양의 전탄소(T-C) 함량을 증가시켜 토양 탄소격리에도 효과적인 것으로 생각되었다. 하지만 과량의 바이오차 시용은 오히려 토양 pH, EC 등에 급격한 영향을 주어 작물 생육을 저해할 우려가 있으므로 바이오차를 사용할 때에는 토양 화학성과 작물 생육을 고려하여 적정 시용량으로 사용해야 할 것으로 생각된다. 따라서 다양한 바이오매스를 활용한 바이오차를 생산하고 이를 작물 생산성 향상을 위해 적절하게 사용하기 위해서는 바이오차 종류 및 작물별로 적정 시용량 설정이 먼저 수반되어야 할 것으로 생각되며 이를 통해 작물

생산성 향상 및 탄소중립을 위한 탄소격리를 위해서 바람직하게 사용될 수 있을 것이라 생각된다.

3.3. 바이오차 시용에 의한 작물 생육 및 수량

느타리버섯 수확후배지 바이오차를 시용량별로 처리하여 배추, 대파를 재배하고 수확기의 배추와 대파 생육 및 수량을 조사한 결과는 Table 8, Table 9와 같다. 바이오차 시용으로 배추의 엽장 및 엽폭 등 생육이 무시용에 비해 양호하였고, 수량은 무시용 대비 바이오차 200 kg/10a 시용시 9.9% 증가하였다(Table 8). 또한 느타리버섯 수확후배지 바이오차를 사용하고 대파 생육을 조사한 결과 바이오차 200 kg/10a까지 시용으로 대파 초장과 엽장, 위경폭 등이 증가하는 경향이었으나 통계적인 차이는 없었다. 생체중은 바이오차 200 kg/10a 시용시 무시용에 비해 21.1% 증가하였다(Table 9). 이는 바이오차 시용에 의한 양분 이용효율 증가에 의한 작물의 질소성분 흡수율 증대 및 미생물 활성으로 인한 영향 등으로 판단되며 바이오차는 연용하면 시용효과가 더 증가한다고 보

Table 8. Effect of Biochar Application on Leaf Length, Width and the Fresh Matter Yield of Chinese Cabbage

Treatments	leaf length	leaf width	No. of normal leaves	fresh matter yield
kg/10a	..... cm		ea/plant	kg/10a
No treatment	49.6b	32.9ns	47.9ns	10,137ns
SMS BC [†] 100	50.2ab	33.5	47.9	10,737
SMS BC 200	51.5a	33.7	48.7	11,140
SMS BC 300	50.5ab	33.8	49.6	10,703
SMS BC 500	50.3ab	32.9	49.2	10,803

[†]SMS BC, spent mushroom substrate biochar.

[‡]Numbers with the same letter within a column are not significantly differed (Duncan's test, p < 0.05).

Table 9. Effect of Biochar Application on Height, Leaf Length, Width and the Fresh Matter Yield of Welsh Onion

Treatments	height	leaf length	leaf width	stem length	stem width	No. of leaves	average weight
kg/10a	..... cm				mm	ea/plant	g/plant
No treatment	63.7ns	42.1ns	2.1b	21.6ns	13.3ns	4.3ns	64.1ns
SMS BC [†] 100	64.4	43.7	2.1b	21.4	14.1	4.5	69.9
SMS BC 200	66.8	45.1	2.3a	22.5	14.7	4.5	77.6
SMS BC 300	63.9	44.4	2.1b	22.1	13.3	4.3	68.4
SMS BC 500	63.7	42.2	2.0b	21.5	13.6	4.4	64.9

[†]SMS BC, spent mushroom substrate biochar.

[‡]Numbers with the same letter within a column are not significantly differed (Duncan's test, p < 0.05).

고되어 있어³⁰⁾ 바이오차의 연용기간을 늘린다면 더 적은 시용량으로도 작물 생육과 수량 증대에 효과적일 것이며 연용에 따라 향후에는 유의적인 차이가 나타날 것으로 생각된다. 또한 바이오차 300 kg/10a 시용시에는 대파 수량이 오히려 감소하는 것으로 나타나 효과적인 바이오차의 시용을 위해서는 작물별 적정 시용량을 구명하는 시험이 필수적이라 판단된다.

4. 결론

본 연구는 경기도내 농업부산물 중 느타리버섯 수확후배지를 사용하여 바이오차를 제조하고 이를 이용한 토양 이화학적 개선 효과와 작물 생육에 미치는 영향을 구명하여 친환경 토양관리기술을 개발하기 위해 실시하였다. 제조된 느타리버섯 수확후배지를 이용한 바이오차는 C 76.2%, H 2.5%, N 3.2%, H/C 0.39로 탄소 함량이 높고 H/C 0.7 이하로 바이오차의 분해 안정성 기준에 적합한 것으로 나타났다. 이를 사용하여 배추와 대파를 재배하면서 시용 효과를 조사한 결과, 바이오차 시용량이 증가할수록 토양 유기물, 전질소(T-N), 전탄소(T-C), 치환성양이온 K 함량이 증가하였고, 양이온치환용량(CEC)이 증가하였다. 바이오차 시용으로 토양의 용적밀도가 통계적으로 유의성 있게 낮아졌으며 공극률은 높아지는 경향으로 토양 물리성이 개선됨을 알 수 있었다. 느타리버섯 바이오차 시용에 의한 토양 이화학적 개선효과로 배추와 대파의 생육이 양호하였으나 수량에서 통계적인 차이는 나타나지 않았다. 하지만 바이오차는 작물별로 시용량 및 연용에 따른 시용 효과 차이가 있을 것으로 생각되어 작물의 종류와 토양화학적 및 연용기간 등을 고려하여 시용하는 것이 바람직할 것으로 생각된다. 느타리버섯 수확후배지를 이용한 바이오차를 토양개량제로 사용하면 토양 이화학적 개선뿐만 아니라 탄소격리에 의한 탄소중립 및 농업 부산물의 유기자원화에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업 연구과제(Project No. PJ0157332023)로 수행되었습니다.

References

1. Moon, Y. H., Lee, S. S., Kang, T. W. and Cho, S. J., "Effects of Supplemental Levels of Spent Mushroom (*Flammulina velutipes*) Substrates on Chemical Composition and Quality of Whole Crop Sorghum Silage", *J Mushroom Sci Prod.*, 3, pp. 136~142. (2012).
2. Semple, K. T., Reid, B. J. and Fermor, T. R., "Impact of composting strategies on the treatment of soils contaminated with organic pollutants", *Environmental Pollution*, 112, pp. 269~283. (2001).
3. Williams, B. C., McMullan, J. T. and McCahey, S., "An initial assessment of spent mushroom compost as a potential energy feedstock", *Bioresource Technology*, 79, pp. 227~230. (2001).
4. Kang, H. W., "Industrial utilization of spent mushroom substrate", *J. of Mushrooms*, 17(3), pp. 85~92. (2019).
5. Kim, C. H., Oh, T. S., Shin, D. G., Cho, Y. K., Kim, Y. W. and Ann, S. W., "Study on the development of horticultural media using recycled used mushroom media", *J Environ Sci Intern*, 23, pp. 303~312. (2014).
6. National Institute of Horticultural and Herbal Science (NIHHS), "Spent mushroom substrate status and recycling plan", Rural Development Administration (RDA), Korea. (2020).
7. Seo, Y. H., Kim, S. W., Choi, S. C., Kim, I. J., Kim, K. H. and Kim, G. Y., "Effects of green manure crop and biochar on nitrous oxide emission from red pepper field", *Korean J. Soil Sci. Fer.*, 45(4), pp. 540~543. (2012).
8. Kim, M. H. and Kim, G. H., "Analysis of Environmental Impacts for the Biochar Production and Soil

- Application”, *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, 36(7), pp. 461~468. (2014).
9. Choi, Y. S., Shin, J. D., Lee, S. I. and Kim, S. C., “Adsorption Characteristics of Aqueous Ammonium Using Rice hull-Derived Biochar”, *Korean J Environ Agric.*, 34(3), pp. 155~160. (2015).
 10. Shin, J. D., Choi, Y. S. and Lee, S. I., “Estimation of Carbon Sequestration and Its Profit Analysis with Different Application Rates of Biochar during Corn Cultivation Periods”, *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association*, 24(3), pp. 83~90. (2016).
 11. Liang, F., Li, G. T., Lin, Q. M. and Zhao, X. R., “Crop yield and soil properties in the first 3 years after biochar application to a calcareous soil”, *J. Integr. Agr.*, 13(3), pp. 525~532. (2014).
 12. Ahmad, M., Ok, Y. S., Rajapaksha, A. U., Lim, J. E., Kim, B. Y., Ahn, J. H., Lee, Y. H., Al-Wabel, M. I., Lee, S. E. and Lee, S. S., “Lead and copper immobilization in a shooting range soil using soybean stover- and pine needle-derived biochars: Chemical, microbial and spectroscopic assessments”, *J. Hazard. Mater.*, 301, pp. 179~186. (2016).
 13. Chen, J., Li, S., Liang, C., Xu, Q., Li, Y., Qin, H. and Fuhrmann, J. J., “Response of microbial community structure and function to short-term biochar amendment in an intensively managed bamboo (*Phyllostachys praecox*) plantation soil: Effect of particle size and addition rate”, *Sci. Total Environ.*, 574, pp. 24~33. (2017).
 14. Woo, S. H., “Biochar for soil carbon sequestration”, *Clean Technology*, 19(3), pp. 201~211. (2013).
 15. Dang, Q., Mba Wright, M. and Brown, R. C., “Ultra low carbon emissions from coal-fired power plants through bio-oil co-firing and biochar sequestration”, *Environmental Science & Technology*, 49(24), pp. 14688~14695. (2015).
 16. Kauffman, N., Dumortier, J., Hayes, D. J., Brown, R. C. and Laird, D. A., “Producing energy while sequestering carbon the relationship between biochar and agricultural productivity”, *Biomass Bioenergy*, 63, pp. 167~176. (2014).
 17. Shin, J. D., Park, D. Y., Kim, H. S., Lee, S. I. and Hong, S. G., “Evaluation of Agro- Environmental Effect and Soil Carbon Sequestration to different Application Ratios of Supplemented Biochar Pellet in the Paddy during Rice Cultivation”, *Korean J Environ Agric.*, 39(2), pp. 114~121. (2020).
 18. Olmo, M., Albuquerque, J. A., Barrón, V., del Campillo, M. C., Gallardo, A., Fuentes, M. and Villar, R., “Wheat growth and yield responses to biochar addition under Mediterranean climate conditions”, *Biology and Fertility of Soils*, 50(8), pp. 1177~1187. (2014).
 19. Ventura, M., Zhang, C., Baldi, E., Fornasier, F., Sorrenti, G., Panzacchi, P. and Tonon, G., “Effect of biochar addition on soil respiration partitioning and root dynamics in an apple orchard. European”, *Journal of Soil Science*, 65(1), pp. 186~195. (2014).
 20. Kim, H. S., Kim, K. R., Yang, J. E., Ok, Y. S., Owens, G., Nehls, T., Wessolek, G. and Kim, K. H., “Effect of biochar on reclaimed tidal land soil properties and maize (*Zea mays* L.) response”, *Chemosphere*, 142, pp. 153~159. (2016).
 21. Han, K. H., Zhang, Y. S., Jung, K. H., Cho, H. R. and Sonn, Y. K., “Evaluating germination of lettuce and soluble organic carbon leachability in upland sandy loam soil applied with rice husk and food waste biochar”, *Korean Journal of Agricultural Science*, 41(4), pp. 369~377. (2014).
 22. Park, D. G., Lee, J. M., Choi, E. J., Gwon, H. S., Lee, H. S., Park, H. R., Oh, T. K. and Lee, S. I., “Carbon Mineralization in different Soils Cooperated with Barley Straw and Livestock Manure Compost Biochars”, *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association*, 30(4), pp. 67~83. (2022).
 23. Park, D. G., Hong, S. G., Jang, E. S. and Shin, J. D., “Assessment of an Optimum Biochar Application Rate for Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) Cultivation

- D”, *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association*, 27(1), pp. 39~48. (2019).
24. International Biochar Initiative (IBI), “Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil IBI-STD-2.1.”. (2015).
25. Park, D. G., Lee, J. M., Choi, E. J., Gwon, H. S., Lee, H. S., Park, H. R., Oh, T. K. and Lee, S. I., “Carbon Mineralization in different Soils Cooperated with Barley Straw and Livestock Manure Compost Biochars”, *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association*, 30(4), pp. 67~83. (2022).
26. National Institute of Agricultural Science and Technology (NIAST), “Investigation and standard for agriculture experiment”, Rural Development Administration (RDA), Korea. (2003).
27. National Institute of Agricultural Science and Technology (NIAST), “Analytical methods of soil and plant”, Rural Development Administration (RDA), Korea. (2000).
28. Chan, K. Y. and Xu, Z., Biochar : nutrient properties and their enhancement, In J. Lehmann and S. Joseph, eds., *Biochar for environmental management*, Science and Technology, pp. 67~84. (2009).
29. Liang, B., Lehmann, J., Solomon, D., Kinyangi, J., Grossman, J., O’Neill, B., Skjemstad, J. O., Thies, J., Luizão, F. J., Petersen, J. and Neves, E. G., “Black Carbon Increases Cation Exchange Capacity in Soils”, *Soil Science Society of America Journal*, 70, pp. 1719~1730. (2006).
30. Jeong, S. J., Oh, J. S., Seok, W. Y. and Cho, M. Y., “The Effect of Treatment of Woody Charred Materials on the Growth and Components of Tomato and Chinese Cabbage”, *Korean J. Org. Agric.*, 16(4), pp. 455~469. (2008).