

Effect of Carbonized Biomass Application on Organic Carbon Accumulation and Soy Bean Yields in Upland Soil

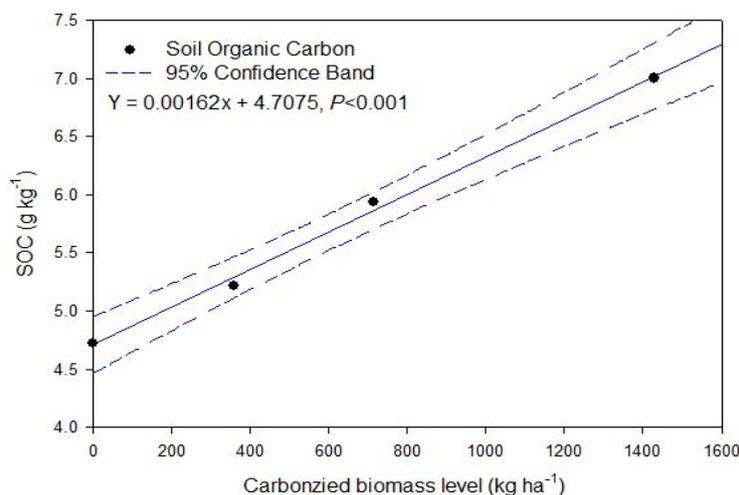
Sun-II Lee*, Woo-Kyun Park, and Gun-Yeob Kim

National Academy of Agricultural Science, Rural Development Administration, Wanju, 55365, Korea

(Received: September 14 2015, Revised: December 15 2015, Accepted: December 20 2015)

Carbonized biomass could be used as a mechanism for long-term storage of C in soils. However, experimental results are variable. Objective of this study was carried out to evaluate the effect of carbonized biomass made from soybean residue on soil organic carbon and seed yield during soybean cultivation. The carbonized biomass was made by field scale mobile pyrolyzer. Pyrolyzer was performed in a reactor operated at 400~500°C for 2 hours using soybean residue. The treatments consisted of four levels as the control without input and three levels of carbonized biomass inputs as 357 kg ha⁻¹, C-1 ; 714 kg ha⁻¹, C-2 ; 1,428 kg ha⁻¹, C-3. It was appeared that seed yield of soybean was 2,847 kg ha⁻¹ for control, 2,897 kg ha⁻¹ for C-1, 2,946 kg ha⁻¹ for C-2 and 3,211 kg ha⁻¹ for C-3 at the end of experiment. It was shown that the contents of SOC were 5.21 g kg⁻¹ for C-1, 5.93 g kg⁻¹ for C-2, 7.00 g kg⁻¹ for C-3 and 4.73 g kg⁻¹ for the control at the end of experiment. Accumulated SOC contents linearly significantly ($P < 0.001$) increased with increasing the carbonized biomass input. The slopes (0.00162) of the regression equations suggest that SOC contents from the soil increase by 0.162 g kg⁻¹ with every 100 kg ha⁻¹ increase of carbonized biomass rate. Consequently the carbonized biomass for byproducts such as soybean residue could increase SOC. It might be considered that the experimental results will be applied to soil carbon sequestration for future study. More long-term studies are needed to prove how long does SOC stay in agricultural soils.

Key words: Carbonized biomass, Pyrolyzer, Soil organic carbon, Soybean residue



Accumulated SOC contents linearly significantly ($P < 0.001$) increased with increasing the carbonized biomass input.

*Corresponding author: Phone: +82632382495, Fax: +82632383823, E-mail: silee83@korea.kr

§Acknowledgement: This work was carried out by the support of Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development (PJ00938303), Rural Development Administration, Republic of Korea.

Introduction

바이오매스는 태양에너지를 이용하여 광합성을 하는 식물체 및 균체와 이를 섭취, 분해하는 동물체 및 분해자를 포함한 생물 유기체 전체를 지칭하며, 유기체를 바탕으로 한 재생 가능한 유기성 자원이다. 최근에는 기후변화와 화석연료의 고갈 위기로 인해 전 세계적으로 다양한 산·재생 에너지의 개발에 노력하고 있으며 (Schneider and McCarl, 2003) 그 중 하나로 유기성자원인 바이오매스의 활용에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

연간 우리나라에서 농업부산물로 발생하는 바이오매스는 약 1,160만톤으로 추정된다 (Park et al., 2011). 이러한 부산물을 소각 처리하는 것은 온실가스 및 각종 유해가스의 방출을 야기 시키지만 (Zhang et al., 2008) 퇴비화 등을 통해 자원순환측면에서 활용하면 토양 비옥도 상승과 대기 중으로 방출되는 탄소원을 줄일 수 있다. 농업부산물을 적절하게 관리하는 것은 지속가능한 작물생산기반을 유지하는데 중요한 역할을 한다. 따라서 농업에서 발생하는 바이오매스를 최적으로 활용하는 방법을 찾는 연구들이 진행되고 있으며, 그 방안의 일환이 농업부산물을 탄화된 바이오매스로 변환하여 이용하는 방법이다. 탄화물은 탄소저장 및 토양개량 효과가 있는 것으로 알려져 있으며, 적용이 쉽고 생산비용 및 에너지 투입이 낮다는 장점이 있어 부산물을 자원 순환하는 것이 바람직한 대안으로 떠오르고 있다 (Laird et al., 2010).

바이오매스 탄화물은 농업부산물을 산소결핍상태의 열분해 과정을 통해 만들어진다. 탄화물내의 탄소는 흑연질 탄소이고, 방향족 화합물 형태이므로 (Glaser et al., 1998) 토양 중에서 화학적으로 안전한 탄소결합 형태를 유지하며 (Mathews, 2008), 생물학적 분해의 영향을 크게 받지 않는 난분해성 물질이다 (Ascough et al., 2010; Nichols et al., 2000). 이러한 특성 때문에 장기간 동안 탄소를 그대로 분해되지 않고 저장할 수 있어 탄화물 내의 탄소는 토양 내에서 수백년 이상 탄소저력 효과를 얻을 수 있다 (Lehmann, 2009; Singh et al., 2012). 이외에도 바이오매스 탄화물은 산성토양 개량과 더불어 양이온 치환능, 양분 및 수분 보유력 증가 등의 다양한 토양개량 효과와 더불어 작물 수량을 증대시킬 수 있다고 보고되고 있다 (Chan et al., 2008).

몇몇 실험실 규모에서 바이오매스 탄화물의 특성을 연구한 결과는 보고되고 있지만, 소규모 농가단위에서 작물조사

를 활용해 바이오매스 탄화물을 만들고 농경지에 투입·활용하는 연구는 거의 전무한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 농가 단위에서 이용할 수 있는 탄화장치를 활용하여 농업부산물로 부터 탄화물을 생산하였다. 그리고 농경지에 환원시켜주기 위하여 콩 재배 농가 밭 토양에서 바이오매스 탄화물을 처리하고 콩 재배기간 동안의 토양 유기탄소 변화와 콩 수확량을 비교 검토하였다.

Materials and Methods

공시 토양 및 재료 본 연구는 충청북도 괴산군 불정면에 위치한 밭 토양 (127°51'04"N 36°52'35"E)에서 수행하였다. 공시토양의 이화학적 특성은 Table 1과 같다. 사양질계 충적토인 강서통에 속하며, 토성은 모래 80.1%, 미사 7.6%, 점토 12.3%의 사양토 (sandy loam)였다. 화학적 특성은 pH 7.1, Electrical conductivity 1.97 dS m⁻¹, Organic matter 8.90 g kg⁻¹, Total nitrogen 0.76 g kg⁻¹, Available P₂O₅ 366.4 mg kg⁻¹, Exchangeable K 0.83, Exchangeable Ca 9.47, Exchangeable Mg 3.56 cmol_c kg⁻¹로 나타나 우리나라 일반 밭토양의 평균치 (NAAS, 2013)보다 pH, EC, 치환성 양이온 함량성분이 높은 토양이었다.

본 연구에 사용한 바이오매스 탄화물은 전년도에 발생한 콩 부산물의 뿌리와 알곡을 제외한 부분을 건조 과정과 파쇄 과정을 거친 후 탄화하였다. 탄화조건은 최대한 공극을 줄여 산소공급을 제한조건으로 만든 후 탄화장치 (OCF-400)에 넣어 400~500°C에서 2시간 동안 열분해 제조하였다. 탄화제조 반응기의 크기는 0.79 × 1.27 m (Φ × h)이며, 재질은 스테인레스로 구성되었다. 공기 유입구와 출구는 바닥 및 상단에 위치하여 있으며, 공기 흐름은 열분해 과정 동안 조절이 용이하게 제작하였다. 또한 스테인레스망은 열분해장치 바닥 15 cm 위에 설치되어 있어 바이오매스가 공기 유입구를 막지 않도록 설치하였다 (Fig. 1). 바이오매스 탄화물의 원료인 콩 부산물은 건조 과정을 거쳐 잘 마른상태를 이용하여 석유 등의 추가적인 에너지 공급 없이 점화 및 열분해를 통하여 바이오매스 탄화물을 생산하였다. 탄화장치에 의해 생산된 바이오매스 탄화물의 비율은 원료물질 대비 30%였다. 시험에 사용된 바이오매스 탄화물의 탄소함량은 639.5 g kg⁻¹, 질소함량은 11.2 g kg⁻¹, C/N ratio는 57로 나타났다 (Table 2).

Table 1. Physico-chemical properties of the experimental soil before crop cultivation.

Soil Texture	pH	EC	Organic Matter	Total Nitrogen	Available P ₂ O ₅	Exchangeable Cations		
						K	Ca	Mg
	(1:5)	(dS m ⁻¹)	(g kg ⁻¹)	(g kg ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)	----- (cmol _c kg ⁻¹) -----		
Sandy loam	7.1	1.97	8.90	0.76	366.4	0.83	9.47	3.56

Table 2. Chemical properties of carbonized biomass and residue of soybean used.

Variable	pH (1:10)	EC (dS m ⁻¹)	Total Carbon (g kg ⁻¹)	Total Nitrogen (g kg ⁻¹)	Exchangeable Cations		
					K	Ca	Mg
					----- (cmol _c kg ⁻¹) -----		
Carbonized biomass	9.6	13.6	639.5	11.2	22.5	10.7	5.71
Raw material (Residue of soybean)	7.3	9.3	439.2	6.1	NA	NA	NA

^{NA}Not applicable



Fig. 1. Field scale biomass pyrolyzer. Pyrolysis convert crop biomass in the reactor that is run at 400~500°C for 2 hours produce carbonized biomass. Note the air intake on the bottom center of the reactor and the exhaust chimney above.

시험구 조성 시험구 처리는 콩 재배로 발생하는 바이오매스의 단위면적당 발생량 2380 kg ha⁻¹ (Park et al., 2011)을 근거로 하여 부산물 원료 대비 바이오매스 탄화물 생산비율인 30%를 기준으로 정하였다. 따라서 ha당 바이오매스 탄화물 714 kg (콩 부산물 발생량 30%)을 100%로 하여 무처리 (Control), 50% (C-1), 100% (C-2), 200% (C-3) 수준으로 시험구를 배치하였다. 결과적으로 Control, C-1, C-2, C-3 처리구의 바이오매스 탄화물 처리량은 각각 0, 357, 714, 1,428 kg ha⁻¹ 사용하여 토양 유기탄소 증대효과를 시험하였다. 시험 처리구당 면적은 32 m² (4 × 8 m)이었고, 포장배치는 난괴법 3반복하였다. 시험에 사용된 콩은 천상콩이고, 재식밀도는 30 × 80 cm이며 시비조건은 콩 사양토 재배지 표준시비량에 준하여 N-P₂O₅-K₂O : 30-30-32 kg ha⁻¹을 사용 후 2014년 6월 30일 파종하였다. 수확은 콩 파종 114일 후인 2014년 10월 21일에 실시하였다. 콩 생산량은 탈곡 후 흐르는 물에 이물질을 제거하고 오븐에서 70°C, 72시간 건조 측정하였다.

시료채취 및 분석방법 토양시료는 탄화물 투입에 따른 토양 탄소저장량과 양분공급 효과를 파악하기 위해 시험구 내에서 콩 파종 직 후과 콩 수확 후 시료를 채취하였다. 토

양시료 채취는 표토 (0~15 cm)를 대상으로 토양채취용 오거를 활용하여 격자용으로 각각 5개씩 채취하여 혼합시료로 사용하였다. 토양분석은 토양 화학분석법 (NAAS, 2000)에 준하여 토양산도 (pH), 전기전도도 (EC), 유기탄소 (SOC), 총 질소 (T-N), 무기태질소 (Inorganic-N), 유효인산 (Av.P₂O₅) 및 치환성 양이온 (Ex. K, Ca, Mg)을 분석하였다. 입경분포는 피펫법으로 분석하였으며, 토성은 미국 농무성법 분류기준을 따랐다 (Gee and Bauder, 1986). pH는 토양을 증류수와 1:5 (W/V)로 혼합한 후 30분간 교반하여 pH meter (Orion 4 star, Thermo, Singapore)로 측정하였고, EC는 pH 측정 후 토양용액을 #42 여과지로 여과 후 EC meter (Orion 4 star, Thermo, Singapore)를 이용하여 측정하였다. 유기탄소 분석기는 TOC-meter (Vario TOC cube, Elementar, Germany)로 분석하였으며, 토양시료에 2 M HCl을 기포가 발생하지 않을때까지 침출 건조시켜 무기탄소 성분을 제거 후 TOC 분석기로 분석하였다 (Wang et al., 2012). 총 질소는 CN analyzer (Vario Max CN, Elementar, Germany), 유효인산은 Lancaster법으로 720 nm 파장에서 비색계 (AU/CARY 300, Varian, Australia)로 분석하였다. 치환성 양이온은 1 M NH₄OAc (pH 7.0) 침출하여 ICP-OES (GBC scientific, USA)로 분석하였다.

바이오매스 탄화물과 원료물질인 콩 부산물은 건조 후 40 mesh로 분쇄한 시료를 사용하여 pH, EC, T-C, T-N을 토양분석과 동일한 장비로 분석하였다 (NAAS, 2000).

통계분석 바이오매스 탄화물 투입에 따른 토양 유기탄소 함량 변화 및 콩 수확량에 미치는 영향을 SAS 통계프로그램 (버전 9.2)을 이용하였다. 처리간의 차이를 비교하기 위하여 조사된 자료는 일반선형모형을 이용한 ANOVA test를 통하여 분석하였다. 또한, F-test 결과 값이 P < 0.05의 범위에서 유의한 경우에만 Duncan's multiple range test를 통해 처리간 차이를 비교하였다.

Results and Discussion

바이오매스 탄화물 특성 콩 부산물을 탄화장치를 통해 생산한 바이오매스 탄화물의 화학성분은 Table 2와 같

다. 바이오매스 탄화물 총 탄소 함량은 원료물질인 콩 부산물의 탄소함량 439.2 g kg^{-1} 보다 약 45.6% 증가하여 639.5 g kg^{-1} 이었고, 총 질소 함량은 콩 부산물의 질소함량 6.1 g kg^{-1} 보다 약 83.6% 증가하여 11.2 g kg^{-1} 로 나타났다. 이는 콩 부산물과 왕겨를 혼합하여 동일한 탄화장치를 통해 생산한 바이오매스 탄화물의 탄소함량 555.8 g kg^{-1} , 질소함량 7.4 g kg^{-1} (Lee et al., 2014)보다 탄소 함량은 83.7 g kg^{-1} , 질소 함량은 3.8 g kg^{-1} 높았다. Jung (2011)은 본 연구의 탄화장치와 같은 원리의 장비를 이용해 목화대, 밀집, 수수대, 옥수수대, 왕겨 등 다양한 농업부산물을 탄화물을 생산과 분석한 결과, 탄소함량의 범위는 $481\sim 697 \text{ g kg}^{-1}$, 질소함량의 범위는 $5.8\sim 16.2 \text{ g kg}^{-1}$ 로 나타났다. 바이오매스 탄화물은 탄화방법, 탄화온도 등에 따라 탄화물 생산수율과 탄화물의 이화학적 특성의 차이가 있다. 대표적으로 탄화온도가 증가할수록 탄화물의 생산 수율은 감소한다. 탄화물의 원소 성분 중 산소, 수소함량은 감소하고 탄소, 질소의 함량은 상대적으로 증가한다 (Baldock and Smernik, 2002). 특히 수소/산소 비율이 낮을수록 탄화물의 탄소 안정도는 높아지게 된다. 즉 탄화조건에 따라 탄화물이 토양에서 영향력이 다르게 나타난다. 따라서 추후 탄화물 제조 조건에 따른 탄화물의 이화학적 특성에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

토양의 화학성 변화 바이오매스 탄화물 처리하고 콩을 재배한 토양의 화학성 변화는 Table 3과 같다. 토양 pH 값은 7.1~7.9 범위로 나타났으며, 탄화물의 투입량이 많을수록 pH는 통계적 차이를 보이며 높게 나타났다. 하지만 재

배기간 동안 약 7.3의 값으로 모든 처리구에서 비슷한 값으로 나타났다. 재배기간 중 토양의 총 질소 함량은 대조구에서 1.20 g kg^{-1} 이었고, 탄화물이 투입된 처리구에서 $1.19\sim 1.32 \text{ g kg}^{-1}$ 의 범위로 탄화물 처리구에서 소폭 높아졌지만, 탄화물의 처리에 따른 통계적 유의한 차이는 발생하지 않았다. 하지만, 콩 재배 후 질소함량은 9.9~22.0% 비율로 낮아지는 경향을 나타냈다. 유효인산 함량도 대조구에서는 366.4 mg kg^{-1} 이었고, 탄화물이 투입된 처리구에서 $370.2\sim 409.6 \text{ mg kg}^{-1}$ 의 범위로 탄화물이 투입된 처리구에서 높았지만 통계적 유의성을 보이지 않았다. 재배기간 동안 유효인산 함량은 19.7~30.7% 비율로 낮아지는 경향을 나타냈다. 즉 재배기간 동안 질소순환과정과 작물의 양분 흡수과정을 통해 질소함량과 유효인산함량은 감소하였다. 질산태질소 함량의 경우 바이오매스 탄화물 투입에 따른 일정한 경향은 보이지 않았지만 C-1 처리구를 제외한 나머지 처리구에서는 콩 재배 후 질산태 질소 함량이 증가하였다. 이는 발 토양은 호기성 상태임으로 질산화작용이 우세하게 발생하였기 때문으로 판단된다. 암모니아태질소 함량은 시험초기 대조구, C-1, C-2 그리고 C-3 처리구에서 각각 33.9, 17.3, 18.7, 그리고 16.5 mg kg^{-1} 을 나타내었다. 즉 시험초기 암모니아태 질소함량이 낮게 나타난 이유는, 탄화물의 표면은 다공성이며 음전하 특성을 지니고 있어 양이온에 대한 흡착력이 강하게 작용한데 그 원인이 있다고 생각된다 (Liang et al., 2006).

토양 유기태 탄소량 바이오매스 탄화물 사용량 증가

Table 3. Chemical properties of the treatment soil.

Experiment days	Treatment	pH	EC	Total Nitrogen	NO ₃ -N	NH ₄ -N	Available P ₂ O ₅
		(1:5)	(dS m ⁻¹)	(g kg ⁻¹)	----- (mg kg ⁻¹) -----		
1 day	Control (0 kg ha ⁻¹)	7.1 c ^a	1.97 a	1.20 a	28.0 b	33.9 a	366.4 a
	C-1 (357 kg ha ⁻¹)	7.4 bc	1.87 a	1.19 a	33.4 a	17.3 b	370.2 a
	C-2 (714 kg ha ⁻¹)	7.6 ab	2.05 a	1.32 a	30.9 ab	18.7 b	409.6 a
	C-3 (1428 kg ha ⁻¹)	7.9 a	2.00 a	1.30 a	27.1 b	16.5 b	402.0 a
114 days	Control (0 kg ha ⁻¹)	7.3 a	1.49 b	0.99 a	34.5 a	2.6 ab	294.3 a
	C-1 (357 kg ha ⁻¹)	7.3 a	1.74 ab	0.93 a	32.8 a	1.9 ab	271.9 a
	C-2 (714 kg ha ⁻¹)	7.3 a	2.05 a	1.10 a	31.9 a	3.4 a	299.1 a
	C-3 (1428 kg ha ⁻¹)	7.2 a	2.00 a	1.17 a	34.1 a	1.4 b	278.7 a

^aValues followed by the same letter are not statistically different at $\alpha=0.05$.

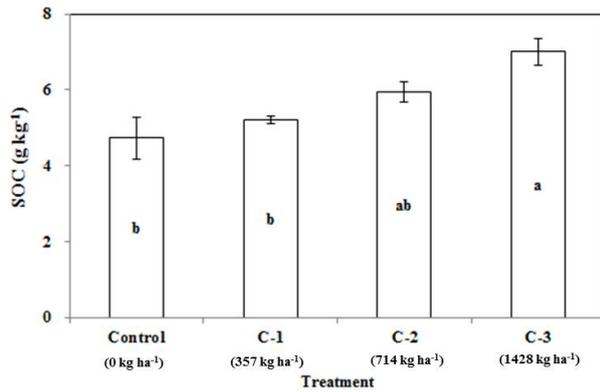


Fig. 2. SOC contents after 114 days after treatment. Vertical bars are standard errors of the means ($n=3$). Data followed by the same letter are not statistically different at $\alpha=0.05$.

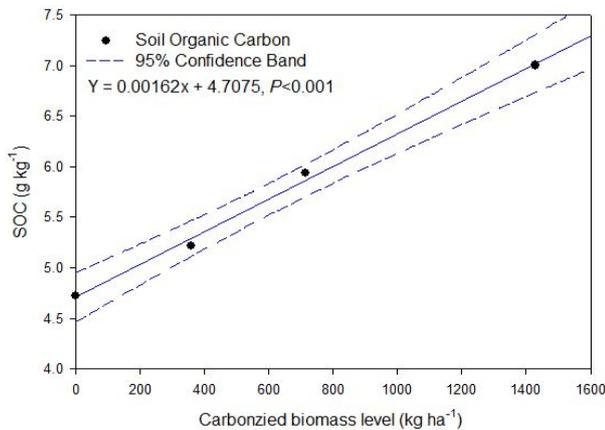


Fig. 3. Relationships between the average SOC contents and carbonized biomass application rates at the end of experiment.

에 따라 토양 유기태 탄소 함량은 증가하는 경향을 보였으며, 통계적으로 유의한 차이를 나타냈다 (Fig. 2). 일반적으로 토양내 유기태 탄소 함량은 토양으로 유입되는 탄소공급량, C/N율, 탄소의 분해에 영향을 받지만 (Khalil et al., 2005; Trinsoutrot et al., 2000), 본 연구에서는 유기물이 열분해에 의해 탄화된 상태의 탄화물 투입이라는 특수성이 기인하여 대조구, C-1, C-2 그리고 C-3 처리구에서 유기태 탄소함량은 각각 4.73, 5.21, 5.93, 그리고 7.00 g C kg⁻¹ 이었다. 토양에 투입된 탄화물은 분해되지 않고 토양내 탄소함량을 증가시켜주었다고 볼 수 있다. 대조구와 비교하여 C-2, C-3 처리구에서는 통계적으로 유의한 차이를 보였다. 따라서 콩 재배로 발생하는 농업부산물 발생량과 탄화물 생산비율을 고려하여 면적당 발생량 100%를 투입한 C-2 처리구 (714 kg ha⁻¹) 이상 투입 시 통계적 유의한 차이가 있었다. 그리고, 바이오매스 탄화물 투입량에 따른 토양 유기태 탄소 함량을 회귀분석한 결과 Fig. 3으로 나타났다. 토양 유기태 탄소함량은 탄화물 투입량에 따라 고도로 높은 상관관계 ($P < 0.001$)를 나타내며 증가하였다. 기울기가 0.00162인 1차 회귀방정식을 나타냈으며, 탄화물 투입량이 100 kg ha⁻¹

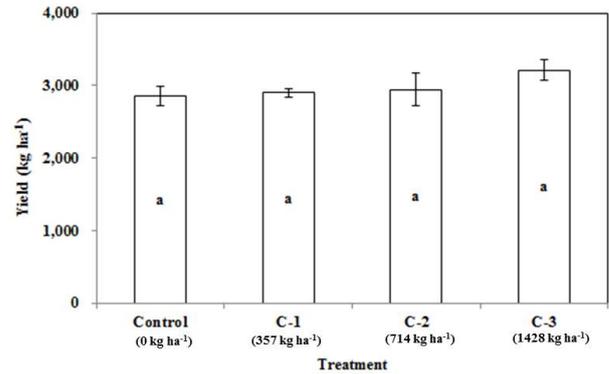


Fig. 4. Seed yield of soybean after 114 days after treatment. Vertical bars are standard errors of the means ($n=3$). Data followed by the same letter are not statistically different at $\alpha = 0.05$.

높아질수록 토양 유기태 탄소함량은 0.162 g kg⁻¹ 증가하였다. 이러한 결과를 미루어 볼 때 장기간 동안 지속적으로 바이오매스 탄화물을施用한다면 토양 탄소의 중요한 공급원이 되며 결론적으로 농경지가 토양 탄소저장으로서의 역할을 할 수 있을 것으로 판단된다.

수확기 콩 수량 농업부산물유래 바이오매스 탄화물 처리에 따른 콩 파종 후 114일의 수확기 콩 수량은 Fig. 4와 같다. 처리구별 콩 수량은 대조구, C-1, C-2 그리고 C-3 처리구에서 각각 2,847, 2,897, 2,946 그리고 3,211 kg ha⁻¹로 나타났다. Duncan's multiple range test를 통한 분산분석결과 처리구간 통계적으로 유의한 차이는 보이지 않았지만, 바이오매스 탄화물 투입량이 많을수록 콩 수확량이 높게 나타났다. 위의 결과에서 처리별 토양 내 유기태 탄소함량 및 콩 수량 측면에서 보면, 바이오매스 탄화물 투입량이 많을수록 효과가 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 살펴볼 때 농경지에 바이오매스 탄화물 투입은 유기태 탄소량 증가와 더불어 작물 수량을 증대시킬 수 있다고 볼 수 있다. 하지만, 현재까지 많은 연구에서 바이오매스 탄화물을 경작지에 투입했을 때 작물에 미치는 영향은 너무나 복잡하고 다양하였다. 농작물 생산성을 증가되기도 하고 반대로 감소되는 결과도 보고되고 있다 (Jeffery et al., 2011). 따라서 탄화물 사용에 대한 종합적인 연구결과를 확인하기 위해 탄화물 장기연용 등 추가연구가 필요할 것으로 판단된다.

Conclusion

농업부산물로부터 생산한 바이오매스 탄화물 처리효과를 구명하기 위하여 콩대 부산물을 활용하여 탄화물을 생산하고 이를 콩 재배지에 투입하여 토양 화학성 변화, 토양 유기태 탄소 그리고 콩 수확량을 비교 검토하였다. 시험토양의 pH값은 탄화물의 투입량이 많을수록 통계적으로 유의하게

증가하였고 작물재배 후에는 전체적으로 7.3으로 비슷한 값을 나타냈다. 토양 EC, TN, 질산태질소, 유효인산 등은 탄화물 투입에 따른 처리구별 통계적 유의한 차이는 발생하지 않았다. 콩 재배 후 토양 유기탄소 함량은 바이오매스 탄화물 사용량이 많을수록 증가하는 경향을 나타냈으며, 통계적으로 유의한 차이를 나타냈다. 대조구, C-1, C-2 그리고 C-3 처리구에서 각각 유기탄소 함량은 4.73, 5.21, 5.93, 그리고 7.00 g C kg⁻¹으로 나타났다. 토양 유기탄소 함량은 탄화물 투입량에 따라 고도로 높은 상관관계 ($P < 0.001$)를 나타내며 증가하였다. 기온이 0.00162인 1차 회귀방정식을 나타냈으며, 탄화물 투입량이 100 kg ha⁻¹ 높아질수록 토양 유기탄소 함량은 0.162 g kg⁻¹ 증가하였다. 이러한 결과를 미루어 볼 때 장기간 동안 지속적으로 바이오매스 탄화물을 사용한다면 토양 탄소의 중요한 공급원이 되며 결론적으로 농경지가 토양 탄소저장으로서의 역할을 할 수 있을 것으로 판단된다.

References

- Ascough P.L., C.J. Sturrock, and M.I. Bird. 2010. Investigation of growth responses in saprophytic fungi to charred biomass. *Isotopes Environ. Health Stud.* 46:64-77.
- Baldock, J.A., and R.J. Smernik. 2002. Chemical Composition and Bioavailability of Thermally Altered Pinus Resinosa (Red pine) Wood. *Org. Geochem.* 33:1093-1109.
- Chan, Y.K., L. Van Zwieten, I. Meszaros, A. Downie, and S. Joseph. 2008. Using poultry litter biochar as soil amendments. *Aust. J. Soil Res.* 46:437-444.
- Gee, G.W. and J.W. Bauder. 1986. Particle size analysis, p. 383-412. In: G.S. Campbell et al., (ed.). *Methods of soil analysis, Part 1. Physical and mineralogical methods.* ASA and SSSA, Madison, WI, USA.
- Glaser, B., L. Haumaier, G. Guggenberger, and W. Zech. 1998. Black carbon in soils: the use of benzenecarboxylic acids as specific markers. *Org. Geochem.* 29:811-819.
- Jeffery, S., F.G.A. Verheijen, M. Velde, and A.C. Bastos. 2011. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agr. Ecosyst. Environ.* 144:175-187.
- Jung W.K. 2011. Characterization of crop residue-derived biochars produced by field scale biomass pyrolyzer. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44:1-7.
- Khalil, M.I., M.B. Hossain, and U. Schmidhalter. 2005. Carbon and nitrogen mineralization in different upland soils of the subtropics treated with organic materials. *Soil Biol. Biochem.* 37:1507-1518.
- Larid, D., P. Fleming, B.Q. Wang, R. Horton, and D. Karlen. 2010. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. *Geoderma.* 158:436-442.
- Lee S.I., W.K. Park, G.Y. Kim, and J.D. Shin. 2014. Effect of the application of carbonized biomass from crop residues on soil organic carbon retention. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 47:486-490.
- Lehmann, J. 2009. Biological carbon sequestration must and can be a win-win approach. *Clim. Change.* 97:459-463.
- Liang, B., J. Lehmann, D. Solomon, J. Kinyangi, J. Grossman, B. O'Neill, J.O. Skjemstad, J. Thies, F.J. Luizao, J. Petersem, and E.G. Neves. 2006. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70:1719-1730.
- Mathews, J.A. 2008. Carbon-negative biofuels. *Energy Policy.* 36:940-945.
- NAAS. 2000. *Methods of soil and plant analysis.* National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon, Korea.
- NAAS. 2013. *Soil testing for major crops,* National Academy of Agricultural Science, RDA, Suwon, Korea.
- Nichols G.J., J.A. Cripps, M.E. Collinson, and A.D. Scott. 2000. Experiments in waterlogging and sedimentology of charcoal: Results and implications. *Paleogeogr. Paleoclimatol. Paleoecol.* 164:43-56.
- Park, W.K., N.B. Park, J.D. Shin, S.G. Hong, and S.I. Kwon. 2011. Estimation of biomass resource conversion factor and potential production in agricultural sector. *Korea J. Environ. Agric.* 30:252-260.
- Schneider, U.A., and B.A. MaCarl. 2003. Economic potential of biomass based fuels for greenhouse gas emission mitigation. *Environ. Resour. Econ.* 24:291-312.
- Singh, B.P., A.L. Cowie, and R.J. Smernik. 2012. Biochar carbon stability in a clayey soil as a function of feedstock and pyrolysis temperature. *Environ. Sci. Technol.* 46:11770-11778.
- Trinsoutrot, I., S. Recous, B. Bentz, M. Lineres, D. Chenby, and B. Nicolardot. 2000. Biochemical quality of crop residues and carbon and nitrogen mineralization kinetics under nonlimiting nitrogen conditions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:918-926.
- Wang, J., L. Zhu, Y. Wang, S. Gao, and G. Daut. 2012. A comparison of different methods for determining the organic carbon and inorganic carbon content of lake sediment from two lakes on the Tibetan Plateau. *Quat. Int.* 250:49-54.
- Zhang, X., S. Kondragunta, C. Schmidt, and F. Kogan. 2008. Near real time monitoring of biomass burning particulate emissions (PM_{2.5}) across contiguous United States using multiple satellite instruments. *Atmos. Environ.* 42:6959-6972.