Korean Journal of Environmental Agriculture

Korean J Environ Agric. 2017;36(2):73-79. Korean
Published online 2017 June 21. https://doi.org/10.5338/KJEA.2017.36.2.13

Online ISSN: 2233-4173
Print ISSN: 1225-3537

Research Article

Open Access

과수원 토양의 탄화물 시용에 따른 아산화질소 발생량 감소와 토양탄소 증가효과

이선일[*], 김건엽, 최은정, 이종식, 정현철

농촌진흥청 국립농업과학원 농업환경부 기후변화생태과

Decreases Nitrous Oxide Emission and Increase Soil Carbon via Carbonized Biomass Application of Orchard Soil

Sun-il Lee[*], Gun-yeob Kim, Eun-jung Choi, Jong-sik Lee and Hyun-cheol Jung (Climate Change & Agroecology Division, Department of Agricultural Environment, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea)

Received: 28 April 2017 / Revised: 15 June 2017 / Accepted: 20 June 2017

ORCID

Sun-il Lee

http://orcid.org/0000-0002-0519-3150

Abstract

BACKGROUND: Carbonized biomass is a carbon-rich solid product obtained by the pyrolysis of biomass. It has been suggested to mitigate climate change through increased carbon storage and reduction of greenhouse gas emission. The objective of this study was to evaluate carbon dioxide (CO_2) and nitrous oxide (N_2O) emissions from soil after carbonized biomass addition.

METHODS AND RESULTS: The carbonized biomass was made from a pyrolyzer, which a reactor was operated about 400~500℃ for 5 hours. The treatments were consisted of a control without input of carbonized biomass and two levels of carbonized biomass inputs as 6.06 Mg/ha for CB-1 and 12.12 Mg/ha for CB-2. Emissions of CO_2 and N_2O from orchard soil were determined using closed chamber for 13 weeks at 25℃ of incubation temperature. It was shown that the cumulative CO_2 were 209.4 g CO_2/m^2 for CB-1, 206.4 g CO_2/m^2 for CB-2 and 214.5 g CO_2/m^2 for the control after experimental periods. The cumulative CO_2 emission was similar in carbonized biomass input treatment compared to the control. It was appeared that cumulative N_2O emissions were 4,478 mg N_2O/m^2 for control, 3,227 mg N_2O/m^2 for CB-1 and 2,324 mg N_2O/m^2 for CB-2 at the end of experiment. Cumulative N_2O emission contents significantly decreased with increasing the carbonized biomass input.

CONCLUSION: Consequently the carbonized biomass from byproducts such as pear branch residue could suppress the soil N_2O emission. The results from the study imply that carbonized biomass can be utilized to reduce greenhouse gas emission from the orchard field.

Key words: Carbonized biomass, Nitrous oxide, Orchard, Soil carbon

서 론

농업분야에서 부산물로 발생하는 바이오매스량은 연간 1,160 만톤으로 추정되고 있다(Park *et al.*, 2011). 하지만 활용도가 낮아 대부분 농장이나 길가에 버려지는 실정이다. 또한, 이런 부산물을 소각할 경우 각종 유해가스와 온실가스가 발생하게 된다(Zhang *et al.*, 2008). 따라서 부산물을 자원으로 활용하는 방안의 연구가 수행중이며, 그 방법으로 부산물을 탄화물로 변환하여 이용하는 연구가 이루어지고 있다.

탄화물은 산소공급이 제한된 조건의 열분해 과정을 통해 만들어진다. 이렇게 만들어진 탄화물의 탄소는 흑연질 상태이

*Corresponding author: Sun-il Lee
Phone: +82-63-238-2495; Fax: +82-63-238-3823;
E-mail: silee83@korea.kr

Table 1. Chemical properties of the studied soil before treatment

Properties	Loam	Sandy Loam
pH (1:5)	7.6 (0.0)[a]	7.5 (0.0)
EC (dS/m)	1.26 (0.22)	1.24 (0.05)
T-C (g/kg)	24.7 (2.6)	15.7 (0.4)
T-N (g/kg)	2.33 (0.03)	1.62 (0.02)
NH_4-N (mg/kg)	88.7 (2.0)	76.5 (2.4)
NO_3-N (mg/kg)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)
Av. P_2O_5 (mg/kg)	2280 (107)	1579 (119)
Exchangeable cation ($cmol_c$/kg)		
K	2.23 (0.25)	3.10 (0.29)
Ca	11.0 (0.07)	10.1 (0.10)
Mg	2.22 (0.02)	2.49 (0.02)

[a]Data followed by different lowercase letters indicate significant carbonized biomass effect at α=0.05.

고, 방향족 화합물 형태이므로(Glaser *et al.*, 1998) 토양 중에서 화학적으로 안전한 탄소결합 형태를 유지한다 (Mathews, 2008). 이러한 특성 때문에 탄화물을 토양에 투입하면 토양 내에서 장기간 분해되지 않고 저장할 수 있어 탄소격리(Carbon sequestration) 측면에서 큰 효과가 있다고 알려져 있다(Lehmann, 2009; Singh *et al.*, 2012). 또한, 탄화물 자체의 높은 pH와 넓은 비표면적의 특성에 따라 농경지 토양에 투입되었을 경우 산성토양 개량 및 미생물 활성도 증가 등의 토양개량효과가 있다(Larid *et al.*, 2010). 농경지 토양 탄화물 시용에 따른 토양의 변화로 인해 토양으로부터 생성되는 온실가스 발생 측면에도 영향을 준다.

농경지에서 발생하는 온실가스는 호기적인 환경에서는 이산화탄소(CO_2)와 아산화질소(N_2O), 혐기적인 환경에서는 메탄(CH_4)이 주로 발생한다. 즉 우리나라 영농과정을 고려하면 농경지 중 밭과 과수원에서는 CO_2와 N_2O이 논에서는 CH_4이 주로 발생한다. 그리고 농경지 토양의 물리적, 화학적, 생물학적 환경에 따라 농경지에서 발생하는 온실가스 발생은 영향을 받는다. 현재까지 농경지 탄화물 시용에 따른 토양의 이화학적 변화와 온실가스 발생에 미치는 영향 및 발생패턴은 다양한 연구결과가 보고되었다. 탄화물 투입에 따라 온실가스 발생량이 감축되거나(Yanai *et al.*, 2007) 아무런 영향이 없는 경우(Cheng *et al.*, 2012), 그리고 온실가스 발생량이 증가하였다는 연구결과(Singh *et al.*, 2009) 등이 있다.

탄화물의 특성을 이용하여 농경지 토양 탄소함량을 증진시킨 연구는 실내시험과 포장시험 연구결과를 통해 보고된바 있으나(Lee *et al.*, 2016) 장기적인 탄소저장 효과를 파악하기 위해 탄화물이 투입된 토양에서 증가된 탄소의 안정성을 파악하는 연구가 필요하다. 또한, 화학적 특성변화로 인해 온실가스 발생량 변화연구는 연구결과가 다양하기 때문에 원인을 해석하는 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 과수원에서 발생하는 부산물인 전정가지로부터 탄화물을 제조하고 토양에 투입하였을 때 토양 탄소함량, 화학성 변화 및 온실가스로 CO_2와 N_2O 발생량을 비교 검토하였다.

재료 및 방법

공시 토양 및 재료

본 연구는 전라남도 나주시 봉황면에 위치한 배 과수원 포장에서 양토(Loam; 126°45′06″N 34°54′19″E), 사양토(Sandy Loam; 126°46′20″N 34°56′23″E)를 각각 채취한 토양을 풍건 후 2 mm 체를 통과한 시료를 본 실험에 사용하였다. 양토의 입경분포는 모래 50.3%, 미사 25.2%, 점토 24.5%이며, 사양토는 모래 63.0%, 미사 19.0%, 점토 18.0%로 구성되어 각각 분류되었다. 양토 토양의 화학적 특성은 토양산도(pH)는 7.6, 전기전도도(Electrical Conductivity)는 1.26 dS/m, 총 탄소(Total Carbon)는 24.7 g/kg, 총 질소(Total Nitrogen)는 2.33 g/kg, 암모늄태 질소(NH_4^+-N)는 88.7 mg/kg, 질산태 질소(NO_3^--N)는 0.00 mg/kg, 유효인산(Available P_2O_5)은 2,280 mg/kg, 치환성 칼륨(Exchangeable K)은 2.23, 치환성 칼슘(Exchangeable Ca)은 11.0, 치환성 마그네슘(Exchangeable Mg)은 2.22 $cmol_c$/kg로 나타났다. 사양토 토양의 화학적 특성은 pH는 7.5, EC는 1.24 dS/m, TC는 15.7 g/kg, TN은 1.62 g/kg, NH_4^+-N는 76.5 mg/kg, NO_3^--N는 0.00 mg/kg, Av. P_2O_5은 1,579 mg/kg, Ex. K은 3.10, Ex. Ca은 10.1, Ex. Mg은 2.22 $cmol_c$/kg로 나타났다(Table 1).

본 연구에 사용한 바이오매스 탄화물은 전년도에 발생한 배 전정가지를 수거, 건조 과정과 파쇄 등의 전처리 과정을 거친 후 전북 고창의 왕겨숯 제조공장 탄화로를 이용하여 열분해하여 생산하였다. 탄화물의 TC는 620.1 g/kg, TN은

Table 2. Chemical properties of carbonized biomass

Variable	pH (1:10)	EC (dS/m)	T-C (g/kg)	T-N (g/kg)	C/N ratio
Carbonized biomass	9.4 (0.0)[a]	16.8 (0.1)	620.1 (26.2)	4.73 (0.35)	131

[a]Values are means with standard errors in parentheses (n=3).

4.73 g/kg이였으며, 탄질비(C/N ratio)는 131이였다(Table 2).

시험구처리 및 항온배양시험

시험구 처리는 연간 배 재배로 발생하는 전정가지 바이오매스의 단위면적당 발생량 14.33 Mg/ha (Park *et al.*, 2011)을 근거로 하여 부산물 원료 대비 바이오매스 탄화물 생산비율인 42.3%를 기준으로 정하였다. 따라서 ha당 탄화물 6.06 Mg (배 전정가지 발생량 42.3%)을 100%로 하여 무처리(Control), 100% (CB1), 200% (CB2) 수준으로 시험구를 배치하였다. 결과적으로 Control, CB1, CB2 처리구의 바이오매스 탄화물 처리량은 각각 0, 6.06, 12.12 Mg/ha 시용하였다. 그리고 배 과원 비옥지 표준시비량에 해당되는 N-P-K (20-13-20 kg/10a)와 계분톱밥퇴비(425 kg/10a)를 모든 처리구에 투입 후 혼합하여 Closed chamber (∅ 9.0 cm, H 12.5 cm)에 충진하였다. 수분은 수분보수력(WHC) 70%, 온도는 25℃로 미생물 분해 활성이 가장 활발한 조건으로(Zeng *et al.*, 2013) 91일간 배양하였다.

항온배양기간 중에는 산소가 충분히 공급되도록 마개를 열어 두었고, 증발되는 수분량을 고려하여 매일 추가적으로 증류수를 보충하여 일정한 수분함량이 유지되도록 하였다. 별도의 100 mL 유리비커에 closed chamber와 동일하게 처리한 토양 80 g을 충진하고 2주 간격으로 시료를 채취하여 무기태 질소함량의 변화를 조사하였다.

토양시료 분석방법

양토 사양토의 토성은 각각 피펫법으로 분석하였으며, 토성은 미국농무성법 분류기준을 따랐다(Gee and Bauder, 1986). 토양시료의 탄화물 투입에 따른 토양이화학성 변화를 파악하기 위해 시험구내에서 항온배양 실험 종료 후 시료를 채취하였다. 토양분석은 토양 화학분석법(NIAS, 2000)에 준하여 pH, EC, TC, TN, Av. P_2O_5 및 Ex. Cations를 분석하였다. 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. 총 탄소는 TOC-meter (Vario TOC cube, Elementar, Germany)로 분석하였다. 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 유도결합플라즈마 분광계(ICP-OES, GBC scientific, USA)로 분석하였다. 항온배양기간 동안 토양시료의 무기태질소 함량은 습토 10 g을 2M KCl로 침출한 다음 질소자동분석기(Auto analyzer 3, BRAN+LUBBE, Germany)로 측정하였다. 탄화물의 pH, EC, TC, TN 함량은 토양분석 시 사용한 장비를 통하여 측정하였다.

가스 flux 측정 및 분석

항온조건에 closed chamber내 발생되는 CO_2와 N_2O 농도를 조사하였다. 시료채취 전 진공펌프를 이용하여 새로운 대기공기를 투입함으로써 closed chamber 내부에 잔존하는 가스를 제거한 후 시료를 채취하였다. 시료의 CO_2와 N_2O 농도는 가스크로마토그래피(Aligent, 7890A)로 분석하였다. 항온조건에 따른 CO_2와 N_2O flux의 계산은 아래의 (식 1)을 이용하였다

CO_2 or N_2O flux (mg/m^2/day) =

$$\rho \times \frac{V}{A} \times \frac{\Delta C}{\Delta t} \times \frac{273}{(T+273)} \quad (식\ 1)$$

여기서, ρ는 기체밀도(1.967 mg/cm^3), V는 챔버 부피(m^3), A는 챔버 표면적(m^2), $\frac{\Delta C}{\Delta t}$는 챔버 내 단위시간당 CO_2 증가농도 (mg/m^3/day), T는 항온온도를 의미한다. 그리고 누적 발생량은 Σ(R D)을 이용하여 항온기간동안 총 CO_2와 N_2O flux를 계산하였다. 이때 R은 CO_2와 N_2O 발생량(mg/m^2/day)이며, D는 시료채취 공백 기간을 나타낸다.

통계분석

탄화물 투입에 따른 토양 화학성 변화에 미치는 영향을 SAS 통계프로그램(버전 9.2)을 이용하여 통계처리 하였다. 처리간의 차이를 비교하기 위하여 조사된 자료는 일반선형모형을 이용한 ANOVA 검증을 통하여 분석하였다. 또한, F-test 결과 값이 $P<0.05$의 범위에서 유의한 경우에만 Duncan`s Multiple Range Test를 실시하였다.

결 과

토양의 화학성 변화

항온시험 후 토양의 화학성 변화는 Table 3과 같다. 토양 pH는 7.3~7.5 범위였으며, 탄화물의 투입량에 따른 통계적 차이는 나타나지 않았다($p>0.05$). 토양의 TC 함량은 토성과

Table 3. Soil pH, TC, TN and C/N ratio in Loam and Sandy Loam by Carbonized Biomass application under closed chamber condition

Soil type	CBI[a] (ton/ha)	pH (1:5)	T-C (g/kg)	T-N (g/kg)	C/N ratio
Loam	0	7.3 a[b]	23.1 a	2.20 a	11 a
Loam	6.06	7.3 a	35.6 b	2.41 b	15 b
Loam	12.12	7.4 a	45.0 c	2.57 c	18 c
Sandy Loam	0	7.4 a	15.2 a	1.67 a	9 a
Sandy Loam	6.06	7.4 a	25.1 b	1.76 a	14 b
Sandy Loam	12.12	7.5 a	31.9 c	1.87 b	17 c
		Effect Probability > F			
Soil		0.002	<0.001	<0.001	0.039
Carbonized biomass		0.216	<0.001	<0.001	<0.001
Soil Carbonized biomass		0.840	0.013	0.128	0.509

[a]CBI, Carbonized biomass input amount
[b]Data followed by different lowercase letters indicate significant carbonized biomass effect at α=0.05.

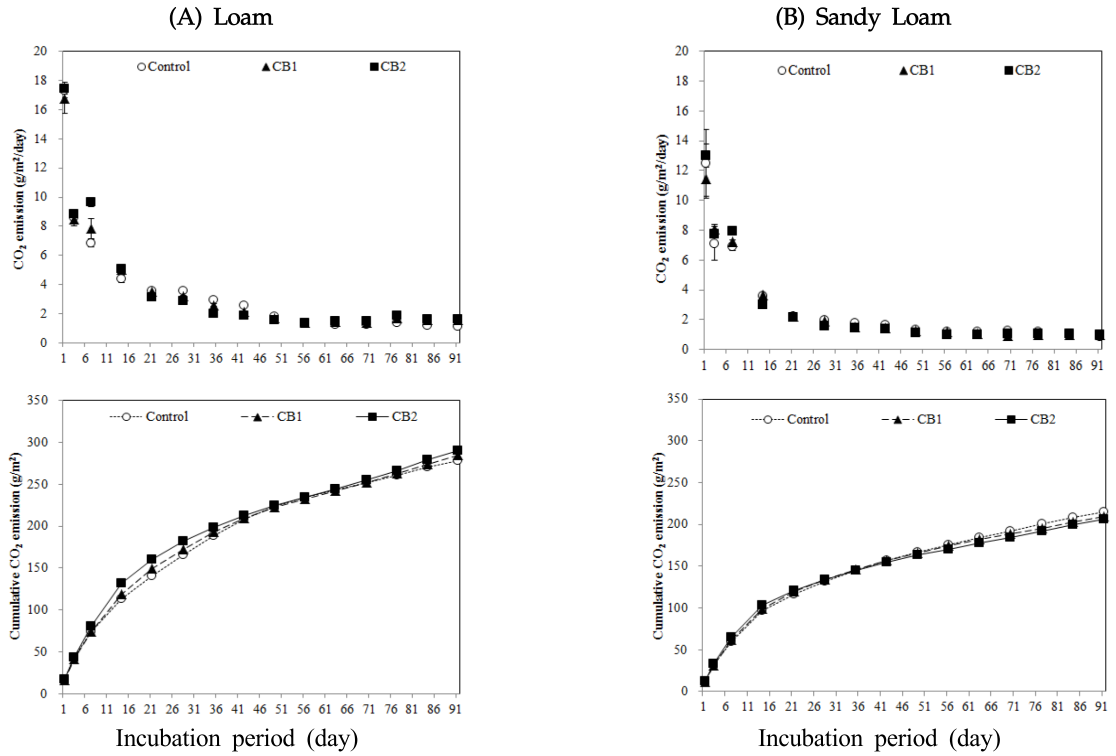

Fig. 1. Rate of CO_2 emission in Loam (A) and Sandy Loam (B) by carbonized biomass application under closed chamber condition. Vertical bars are standard errors of the means (n=3).

탄화물 투입량에 따라 차이를 나타냈다(p<0.001). 양토에서 Control, CB-1, CB-2 처리구에서 TC는 각각 23.1, 35.6, 45.0 g/kg이였고, 사양토에서 Control, CB-1, CB-2 처리구에서 TC는 각각 15.2, 25.1, 31.9 g/kg이였다. 토양의 TN 함량도 토성과 탄화물 투입량에 따라 차이를 나타냈다(p<0.001). 양토에서 Control, CB-1, CB-2 처리구에서 TN은 각각 2.20, 2.41, 2.57 g/kg이였고, 사양토에서 Control, CB-1, CB-2 처리구에서 TN은 각각 1.67, 1.76, 1.87 g/kg 이였다. 토양의 C/N ratio는 탄화물 투입량에 따라 차이를 나타냈다(p<0.001). 양토에서 Control, CB-1, CB-2 처리구에서 C/N ratio는 각각 11, 15, 18 이였고, 사양토에서 Control, CB-1, CB-2 처리구에서 C/N ratio는 각각 9, 14, 17이였다.

CO_2 배출특성

CO_2 배출량은 양토, 사양토 모두 인큐베이터 초기에 높게 나타났다(Fig. 1). 양토는 41일, 사양토는 26일 이후부터 3 g CO_2/m^2/day 이하로 발생하였고, 탄화물 투입수준에 따른

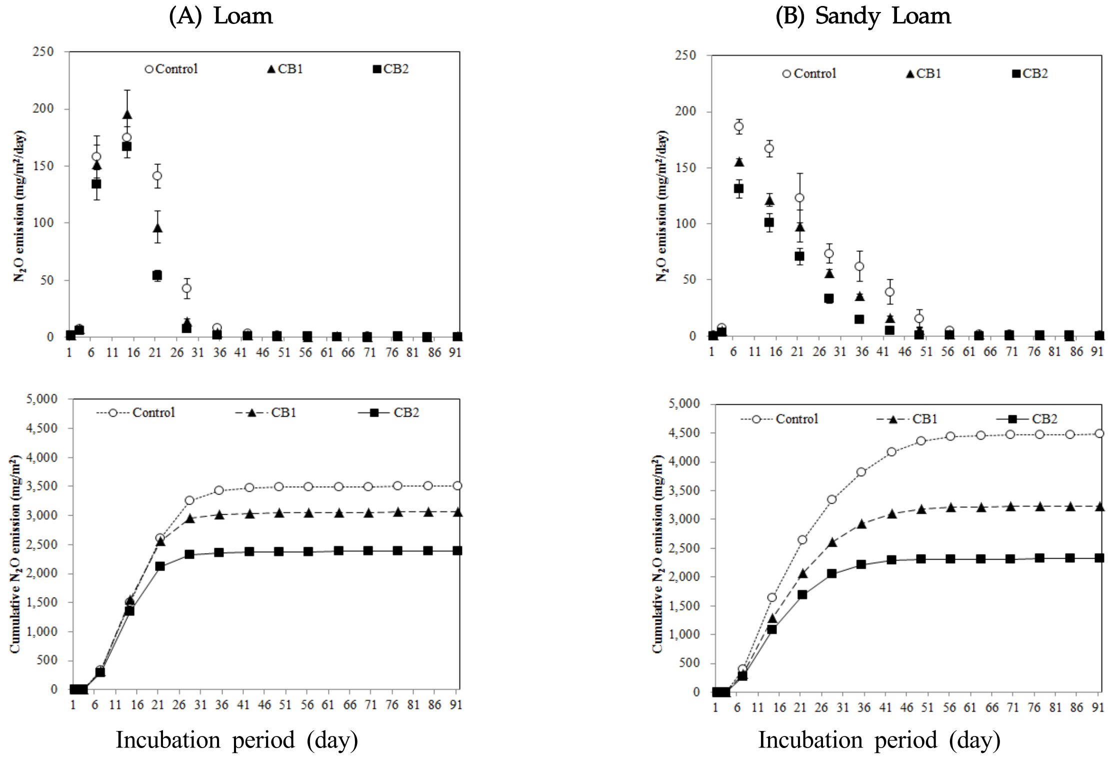

Fig. 2. Rate of N_2O emission in Loam (A) and Sandy Loam (B) by carbonized biomass application under closed chamber condition. Vertical bars are standard errors of the means (n=3).

차이는 발생하지 않았다. 91일째 누적 CO_2 배출량은 양토 Control, CB-1, CB-2 처리구에서 각각 278.3, 284.8, 290.1 g CO_2/m^2이였고, 사양토에서 Control, CB-1, CB-2 처리구에서 각각 214.5, 209.4, 206.4 g CO_2/m^2이였다.

N_2O 배출특성

N_2O 배출량은 양토, 사양토 모두 7일 이후 급격히 배출되었다(Fig. 1). 양토는 36일, 사양토는 51일 이후부터는 N_2O는 거의 발생하지 않았다. 91일째 누적 N_2O 배출량은 양토 Control, CB-1, CB-2 처리구에서 각각 3,507, 3,065, 2,388 mg N_2O/m^2이였고, 사양토에서 Control, CB-1, CB-2 처리구에서 각각 4,478, 3,227, 2,324 mg N_2O/m^2이였다. 항온시험 기간동안 토양의 무기태질소 함량변화는 Fig. 3과 같다. NH_4^+는 처리구별 시기별 큰 차이가 발생하지 않았고, NO_3^- 함량은 양토는 36일 사양토는 51일 최고 농도값을 나타냈다.

고 찰

탄화물을 투입하지 않은 양토와 사양토 Control 처리구의 총 탄소함량은 각각 23.1, 15.2 g/kg으로 양토에서 사양토보다 높게 나타났다(Table 3), 토양에서 발생하는 CO_2는 토양탄소함량이 많을수록 CO_2 발생 source가 증가하기 때문에 총 누적 CO_2 배출량도 양토에서 278.3 g/m^2, 사양토에서 214.5 g/m^2으로 양토가 사양토보다 배출되는 CO_2가 높았다(Fig. 1). 탄화물 투입에 의해 양토와 사양토 모두 총 탄소함량은 9.9~21.9 g/kg 증가하였지만(Table 3), 누적 CO_2 배출량은 8.1 g/m^2 감소하거나 11.8 g/m^2 증가하였다(Fig. 1). 토양에서 배출되는 CO_2는 토양탄소함량에 영향을 받지만, 탄화물 투입에 의해 증가된 토양탄소함량은 CO_2 배출에 영향을 주지 않은 경향을 나타냈다(Fig. 1). 즉 탄화물은 생물학적 분해의 영향을 받지 않는 난분해성 물질이기 때문에(Nichols *et al.*, 2000; Ascough *et al.*, 2010) 탄소함량은 증가하였지만 분해되지 않아 직접적인 CO_2 배출에 영향을 주지 않았다.

토양에서 배출되는 N_2O는 암모니아화, 질산화 및 탈질작용 등의 토양질소의 변동과 유기물의 분해가 영향을 미친다(Khalil *et al.*, 2005). 토양에서 배출되는 N_2O와 토양의 NH_4^+, NO_3^- 함량을 조사한 결과 양토와 사양토 모두에서 배출되는 N_2O는 탄화물 투입량이 많을수록 감소하였다. 양토에서 탄화물 투입량이 많을수록 누적 N_2O 발생량이 12.6%, 31.9% 감소하였고 사양토에서도 투입량이 많을수록 각각 27.9%, 48.1% 감소하였다(Fig. 2). 탄화물 투입에 따라 liming effect로 인해 pH가 증가하여(Table 3) 탈질효과의 증대로 N_2가스로 발생이 증가하여 상대적으로 N_2O 배출량이 감소하였다고 생각된다(Cavigelli and Robertson, 2000). 또한 탄화물 투입된 토양의 C/N ratio의 증가하여(Table 3) 질소의 부동화에 의해 N_2O 배출량에 영향을 주었다고 판단된다(Cayuela *et al.*, 2014). 하지만 항온기간 중 무기태질소의 변화량은 탄화물 투입 수준에 따른 차이가 발생하지 않아(Fig. 3) 추후 추가적인 검토가 필요할 것으로 사료된다. 그리고 NO_3^- 함량은 질산화가 최대로 일어난 시점인 양토에서 36

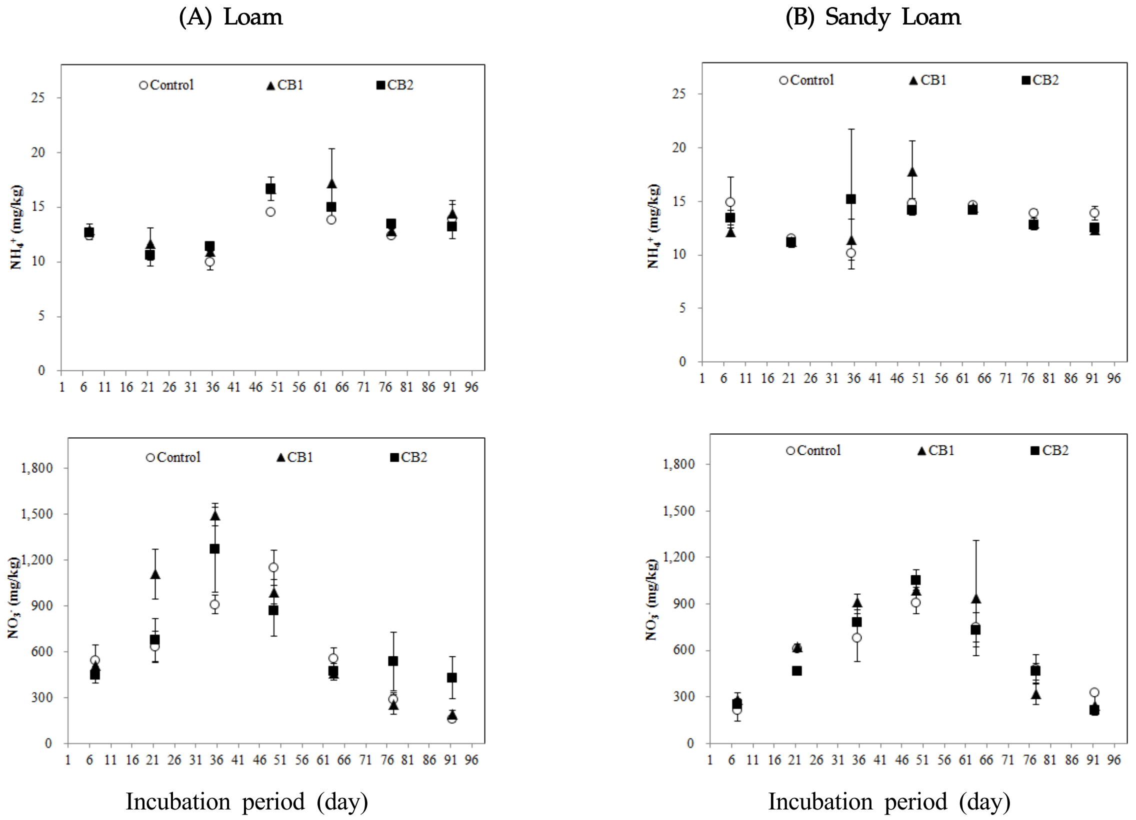

Fig. 3. Changes of NH_4^+-N and NO_3^--N concentration in Loam (A) and Sandy Loam (B) by carbonized biomass application under closed chamber condition. Vertical bars are standard errors of the means (n=3).

일, 사양토에서 51일까지 일어난 것은(Fig. 3) N_2O 마지막으로 배출되는 시점과 동일하여(Fig. 2) 질산화과정과 N_2O발생의 연관성이 높음을 확인할 수 있었다.

요 약

본 연구는 농가에서 버려지는 부산물을 탄화물로 변환한 후 토양에 적용하여 토양의 화학적 특성 변화와 온실가스 발생량을 비교하였다. 탄화물로의 활용은 세 가지의 장점이 있었다. 첫 번째 버려지는 자원은 활용하여 재이용한 측면, 두 번째 농경지의 토양탄소 함량을 증진 시킬 수 있는 측면, 세 번째 농경지에서 발생하는 아산화질소를 줄일 수 있는 측면에서 유용할 것으로 판단된다. 하지만 N_2O 감축기작에 대한 정확한 파악을 위해 질소순환과 연계된 추가적인 연구가 필요하다.

Acknowledgement

This work was carried out by the support of Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development (PJ01261403), Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

Ascough, P. L., Sturrock, C. J., & Bird, M. I. (2010). Investigation of growth responses in saprophytic fungi to charred biomass. Isotopes in Environmental and Health Studies, 46(1), 64-77.

Cavigelli, M. A., & Robertson, G. P. (2000). The functional significance of denitrifier community composition in a terrestrial ecosystem. Ecology, 81(5), 229-241.

Cayuela, M. L., Van Zwieten, L., Singh, B. P., Jeffery, S., Roig, A., & Sánchez-Monedero, M. A. (2014). Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: A review and meta-analysis. Agriculture, Ecosystems & Environment, 191, 5-16.

Cheng, Y., Cai, Z. C., Chang, S. X., Wang, J., & Zhang, J. B. (2012). Wheat straw and its biochar have contrasting effects on inorganic N retention and N_2O production in a cultivated black chernozem. Biology and Fertility of Soils, 48(8), 941–946.

Gee, G. W., & Bauder, J. W. (1986). Particle size analysis. Physical and mineralogical methods (eds. Campbell, G. S. *et al.*), pp. 383-412. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, WI, USA.

Glaser B., Haumaier, L., Guggenberger, G., & Zech. W. (1998). Black carbon in soils: the use of benzenecarboxylic acids as specific markers. Organic Geochemistry, 29(4), 811-819.

Khalil, M. I., Hossain, M. B., & Schmidhalter, U. (2005). Carbon and nitrogen mineralization in different upland soils of the subtropics treated with organic materials. Soil Biology and Biochemistry, 37(8), 1507-1518.

Larid, D., Fleming, P., Wang, B. Q., Horton, R., & Karlen. D. (2010). Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. Geoderma, 158(3), 436-442.

Lee, S. I., Lee J. S., Kim G. Y., Choi, E. J., Suh S. U., & Na U. S. (2016). Effect of carbonized biomass derived from pruning on soil carbon pools in pear orchard. Korean Journal of Environmental Agriculture, 35(3), 159-165.

Lehmann, J. (2009). Biological carbon sequestration must and can be a win-win approach. Climate Change. 97(3), 459-463.

Mathews, J. A. (2008). Carbon-negative biofuels. Energy Policy, 36(3), 940-945.

Nichols G. J., Cripps, J. A., Collinson, M. E., & Scott. A. D. (2000). Experiments in waterlogging and sedimentology of charcoal: Results and implications. Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology, 164(1), 43-56.

Park, W. K., Park, N. B., Shin, J. D., Hong, S. G., & Kwon S. I. (2011). Estimation of biomass resource conversion factor and potential production in agricultural sector. Korean Journal of Environmental Agriculture, 30(3), 252-260.

Singh, B. P., Cowie A. L., & Smernik, R. J. (2012). Biochar carbon stability in a clayey soil as a function of feedstock and pyrolysis temperature. Environmental Science and Technology, 46(21), 11770-11778.

Singh, B. P,, Hatton, B. J., Singh, B., Cowie, A., & Kathuria, A. (2009). Influence of biochars on nitrous oxide emission and nitrogen leaching from two contrasting soils. Journal of Environmental Quality. 39(4), 1224-1235.

Yanai, Y., Toyota, K., & Okazaki, M. (2007). Effects of charcoal addition on N2O emissions from soil resulting from rewetting air-dried soil in short-term laboratory experiments. Soil Science and Plant Nutrition. 53(2), 181-188.

Zeng, W., Xu, C., Wu, J., Huang, J., & Ma, T. (2013). Effect of salinity on soil respiration and nitrogen dynamics. Ecological Chemistry and Engineering S. 20(3), 519-530.

Zhang, X., Kondragunta, S., Schmidt, C. & Kogan, F. (2008). Near real time monitoring of biomass burning particulate emissions (PM2. 5) across contiguous United States using multiple satellite instruments. Atmospheric Environment, 42(29), 6959-6972.