

밭 토양에서 다양한 바이오차 시용에 따른 이산화탄소 및 아산화질소 감축효과

이선일[†], 김건엽, 최은정, 이종식, 정현철
국립농업과학원 기후변화생태과

Reduction of Carbon Dioxide and Nitrous Oxide Emissions through Various Biochars Application in the Upland

Sun-Il Lee[†], Gun-Yeob Kim, Eun-Jung Choi, Jong-Sik Lee, Hyun-Cheol Jung
Climate Change & Agroecology Division, National Institute of Agricultural Sciences

(Received: Apr. 11, 2018 / Revised: May 10, 2018 / Accepted: May 14, 2018)

ABSTRACT: Biochar 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 (CO₂) and nitrous oxide (N₂O) emissions from soil after various biochars addition. The biochars were produced by pyrolysing pear branch, rice hull and bean straw at 400~500°C. The treatments were consisted of a control without input of biochar and three type biochars input as 5.0 Mg/ha. Emissions of CO₂ and N₂O from upland soil were determined using closed chamber for 8 weeks at 25°C of incubation temperature. It was shown that the cumulative CO₂ were 207.1 to 255.2 g CO₂/m² for biochar input treatments and 258.6 g CO₂/m² for the control after experimental periods. The cumulative CO₂ emission was slightly decreased in biochar input treatment compared to the control. It was appeared that cumulative N₂O emissions were 2,890.6 mg N₂O/m² for control, 379.7 to 525.2 mg N₂O/m² for biochar input treatment at the end of experiment. All biochar treatments were found to significantly reduce N₂O emission by 82~87%. Consequently the biochar from byproducts such as pear branch, rice hull and bean straw could suppress the soil N₂O emission. The results from the study imply that biochar can be utilized to reduce greenhouse gas emission from the upland field.

Keywords: Biochar, Carbon dioxide, Inorganic nitrogen, Nitrous oxide

초 록: 다양한 농업 부산물을 열분해하여 바이오차를 생산하고 이를 밭 농경지에 투입함에 따라 토양 화학적 변화와 온실가스 발생량에 대해 비교하여 평가하였다. 실내 인큐베이터 실험으로 항온조건은 미생물 활성이 가장 활발한 조건인 수분보수력 70%, 온도는 25°C 조건에서 8주간 실험을 수행하였다. 그 기간 동안 주기적으로 가스시료를 채취하여 온실가스를 각각 분석하였다. 누적 이산화탄소 발생량은 바이오차를 투입하지 않은 대조구에서 258.6 g CO₂/m² 그리고 바이오차를 투입한 처리구에서는 207.1에서 255.2 g CO₂/m² 의 범위로 발생하였다. 즉 바이오차가 투입됨에 따라 이산화탄소 발생량이 증가하지 않고 비슷하거나 조금 감소하는

[†] Corresponding author(e-mail : silee83@korea.kr)

경향을 나타냈다. 아산화질소의 누적 발생량은 대조구에서 $2,890.6 \text{ mg N}_2\text{O/m}^2$ 그리고 바이오차를 투입한 처리구에서는 379.7 에서 $525.2 \text{ mg N}_2\text{O/m}^2$ 의 범위로 발생하였다. 바이오차가 투입됨에 따라 아산화질소 발생량은 80% 이상 감축할 수 있었다. 따라서 바이오차를 밭 농경지에 적용한다면 아산화질소 발생량을 감축할 수 있는 소재로 활용할 수 가 있을 것이다.

주제어: 무기태질소, 바이오차, 아산화질소, 이산화탄소

1. 서 론

농업분야에서 작물을 수확한 후 발생하는 부산물 바이오매스는 연간 1,000 만톤 이상으로 추정되고 있다¹⁾. 일부 부산물은 자원으로써 이용하고 있지만, 활용도가 낮은 부산물은 농장주변에 버려지는 실정이다. 또한, 이런 부산물을 소각할 경우 각종 유해가스와 온실가스가 발생하게 된다²⁾. 따라서 활용도가 낮아 소각되어지는 부산물을 바이오차로 변환하여 이용하면 버려지는 자원을 재이용할 수 있다.

최근 바이오차는 탄소를 격리할 수 있는 소재로 확인되어 전 세계적인 관심을 받고 있다³⁾. 바이오차는 바이오매스를 산소공급이 제한된 조건의 열분해 과정을 통해 만들어진다. 이렇게 만들어진 바이오차의 탄소는 화학적으로 안정적인 탄소결합 형태를 유지한다⁴⁾. 이러한 특성 때문에 바이오차를 토양에 투입하면 토양 내에서 장기간 분해되지 않고 저장할 수 있어 탄소격리 (Carbon sequestration) 효과가 크다고 있다고 알려져 있다⁵⁻⁶⁾. 또한, 바이오차 자체의 높은 pH와 넓은 비표면적의 특성에 따라 농경지 토양에 투입되었을 경우 산성토양 개량 및 미생물 활성도 증가 등의 토양개량효과가 있다⁷⁾. 바이오차 시용에 따른 토양의 이화학적 특성이 달라지고 그에 따라 농경지 토양에서 발생하는 온실가스에도 영향을 미칠 수 있다.

농경지에서 발생하는 온실가스는 산소 공급이 충분한 호기적인 환경에서는 이산화탄소 (CO_2)와 아산화질소 (N_2O)가 발생되나, 산소공급이 제한된 혐기적인 환경에서는 메탄 (CH_4)이 주로 발생된다. 즉 우리나라 영농과정을 고려하면 농경지 중 밭에서는 CO_2 와 N_2O 가, 논에서는 CH_4 이 주로 발생한다. 따라서 밭에서 바이오차 투입에 따른 토양의 이화학적

변화와 CO_2 , N_2O 발생에 미치는 영향을 파악하는 연구가 필요 할 것이다. 현재까지 농경지 바이오차 시용에 따른 토양의 이화학적 변화와 온실가스 발생에 미치는 영향 및 발생패턴은 다양한 연구결과가 보고되었다. 바이오차 투입에 따라 온실가스 발생량이 감축되거나⁸⁾ 아무런 영향이 없는 경우⁹⁾, 그리고 온실가스 발생량이 증가하였다는 연구결과¹⁰⁾ 등이 있다.

바이오차의 특성을 이용하여 농경지 토양 탄소함량을 증진시킨 연구는 실내시험과 포장시험 연구결과를 통해 보고된바 있으나¹¹⁾ 탄소저장 효과를 파악하기 위해 바이오차가 투입된 토양에서 증가된 탄소의 안정성을 파악하는 연구가 필요하다. 과수원토양에 바이오차를 투입하였을 때, 토양탄소량은 증가하였지만, CO_2 배출에 영향을 주지 않았고, N_2O 는 12.6~48.1% 감소하였다¹²⁾. 하지만, 화학적 특성변화로 인해 온실가스 발생량 변화연구는 그 결과가 다양하기 때문에 원인을 해석하는 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 다양한 부산물을 이용해 바이오차를 생산하고 이를 밭 토양에 투입하였을 때 토양 탄소함량, 화학성 변화 및 온실가스인 CO_2 와 N_2O 발생량을 비교하여 검토하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 공시 토양 및 바이오차 제조

본 연구는 전라북도 군산시 옥산면에 위치한 밭 토양에서 ($35^\circ 56' \text{ N}$, $126^\circ 45' \text{ E}$) 채취한 토양을 풍건 후 2 mm 체를 통과하여 공시재료로 사용하였다. 시험토양의 입경분포는 모래 44.6%, 미사 40.0%, 점토 15.3로 구성되고, 토성은 양토로 분류되었다.

Table 1. Physical and Chemical Properties of the Studied Soil before Treatment

Particle size distribution (%)			pH (1:5)	T-C (g/kg)	T-N (g/kg)	C/N ratio	Av. P ₂ O ₅ (mg/kg)
Sand	Silt	Clay					
44.6	40.0	15.3	7.4	12.3	1.21	10	219.5

토양의 화학적 특성은 토양산도 (pH)는 7.4, 총 탄소 (Total Carbon)는 12.3 g/kg, 총 질소 (Total Nitrogen)는 1.21 g/kg, 유효인산 (Available P₂O₅)은 219.5 mg/kg, 탄질비는 10 이었다 (Table 1).

본 연구에 사용한 바이오차는 전년도에 발생한 배 전정가지, 왕겨 그리고 콩대를 수거, 건조 과정과 파쇄 등의 전처리 과정을 거친 후 전복 고창의 왕겨 숲 제조공장 탄화로를 이용하여 열분해하여 생산하였다.

2.2. 토양 및 바이오차 특성분석

토성은 각각 비중계법으로 분석하였으며, 토성은 미국농무성법 분류기준을 따랐다¹³⁾ 토양시료의 바이오차 투입에 따른 토양화학성 변화를 파악하기 위해 시험구내에서 시료를 채취하였다. 토양분석은 토양 화학분석법¹⁴⁾에 준하여 pH, T-C 및 T-N을 분석하였다. pH는 토양을 증류수와 1:5 (W/V)로 혼합한 후 30분간 교반하여 pH meter (Orion 4 star, Thermo, Singapore)로 측정하였고, 총 탄소는 TOC-meter (Vario TOC cube, Elementar, Germany)로 분석하였다. 총 질소는 CN analyzer (Vario Max CN, Elementar, Germany)로 분석하였다. 유효인산은 Lancaster법으로 720 nm 파장에서 비색계 (AU/CARY 300, Varian, Australia)로 분석하였다. 향온배양기간 동안 토양시료의 무기태질소 함량은 습토 10 g을 2M KCl로 침출한 다음 질소자동분석기 (Auto analyzer 3, BRAN+LUBBE, Germany)로 측정하였다. 바이오차의 pH는 토양분석 시 사용한 장비를 통하여 측정하였고, T-C, T-N, T-H는 Elemental Analyzer (Vario MACRO cube, Elementar, Germany)로 분석하였다. 바이오차의 비표면적은 Surface area analyzer (BELSORP-max, BEL, Japan)로 분석하였다.

생산된 배 전정가지 바이오차 (PB; pear branch biochar), 왕겨 바이오차 (RB; rice hull biochar) 및 콩

Table 2. Chemical Properties of Various Biochars

Biochar type*	pH (1:10)	T-C (g/kg)	T-N (g/kg)	T-H (g/kg)	H:C ratio	Surface area (m ² /g)
PB	10.3	722.6	12.4	25.9	0.36	3.8
RB	10.8	566.9	5.7	17.6	0.31	159.6
BB	10.8	579.6	19.6	30.6	0.53	182.0

*PB, pear branch biochar; RB, rice hull biochar; BB, bean straw biochar

대 바이오차 (BB; bean straw biochar)의 화학적 특성은 Table 2와 같다.

2.3. 시험구 처리 및 향온배양시험

시험구 처리는 배 전정가지 바이오차, 왕겨 바이오차 그리고 콩대 바이오차를 ha당 5.0 Mg의 투입하는 처리구와 바이오차를 투입하지 않는 대조구로 배치하였다. 그리고 옥수수 표준시비량에 해당되는 N-P₂O₅-K₂O (17.2-3.25-6.87 kg/10a)와 돈분톱밥퇴비 (440 kg/10a)를 모든 처리구에 투입 후 혼합하여 closed chamber (Ø 9.0 cm, H 12.5 cm)에 충전하였다. 수분은 수분보수력 (WHC) 70%, 온도는 25°C로 미생물 분해 활성이 가장 활발한 조건으로¹⁵⁾ 58일간 배양하였다.

향온배양기간 중에는 산소가 충분히 공급되도록 마개를 열어 두었고, 증발되는 수분량을 고려하여 매일 추가적으로 증류수를 보충하여 일정한 수분함량이 유지되도록 하였다. 별도의 200 mL 유리비커에 closed chamber와 동일하게 처리한 토양 150 g을 충전하고 1주 간격으로 시료를 채취하여 무기태 질소함량의 변화를 조사하였다.

2.4. 가스 flux 측정 및 분석

향온조건에 closed chamber내 발생되는 CO₂와 N₂O 농도를 조사하였다. 시료채취 전 진공펌프를 이용하여 새로운 대기공기를 투입함으로써 closed chamber 내부에 잔존하는 가스를 제거한 후 시료를 채취하였다. 시료의 CO₂와 N₂O 농도는 가스크로마토그래피 (7890A, Agilent, USA)로 분석하였다. 향온조건에 따른 CO₂와 N₂O flux의 계산은 아래의 (식 1)을 이용하였다

$$\text{CO}_2 \text{ or N}_2\text{O flux (mg/m}^2\text{/day)} = \rho \times \frac{V}{A} \times \frac{\Delta C}{\Delta t} \times \frac{273}{(T+273)} \quad (\text{식 1})$$

여기서, ρ 는 기체밀도로써 CO_2 는 1.977 mg/cm^3 , N_2O 는 1.967 mg/cm^3 , V 는 챔버 부피 (m^3), A 는 챔버 표면적 (m^2), $\frac{\Delta C}{\Delta t}$ 는 챔버 내 단위시간당 CO_2 및 N_2O 의 증가농도 ($\text{mg/m}^3\text{/day}$), T 는 항온온도를 의미한다. 그리고 누적 발생량은 $\Sigma(R \times D)$ 을 이용하여 항온기간 동안 총 CO_2 및 N_2O flux를 계산하였다. 이때 R 은 CO_2 및 N_2O 발생량 ($\text{mg/m}^2\text{/day}$)이며, D 는 시료채취 공백 기간이다.

2.5. 통계분석

다양한 바이오차 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.

3. 결과

3.1. 토양의 화학성 변화

바이오차 투입에 따른 토양의 화학성 변화는 Table 3과 같다. 토양 pH는 7.5~7.8 범위였으며, 콩대 바이오차 투입에 따라 유의한 차이($p < 0.05$)가 나도록 증가하였다. 토양의 T-C 함량은 바이오차가 투입됨에 따라 매우 유의한 차이를 나타냈다 ($p < 0.001$). Control, PB, RB 그리고 BB 처리구에서 T-C는 각각 16.0, 22.5, 23.6 그리고 23.3 g/kg 이었다. 토양의 T-N 함량은 왕겨 바이오차와 콩대 바이오차 투입 처리구에서 유의하게 증가하였다 ($p < 0.05$). 토양의 C/N 율은 바이오차 투입에 따른 탄소함량과 질소함량 변화에 따라 유의한 차이를 나타냈다 ($p < 0.05$). Control, PB, RB 그리고 BB 처리구에서 C/N 율은 각각 8, 11, 10 그리고 9 이었다.

Table 3. Soil pH, TC, TN and C/N Ratio by Biochars Application under Closed Chamber Condition

Treatment [*]	pH (1:5)	T-C (g/kg)	T-N (g/kg)	C/N ratio
Control	7.6 b ^{**}	16.0 b	2.03 b	8 c
PB	7.5 b	22.5 a	1.96 b	11 a
RB	7.5 b	23.6 a	2.41 a	10 ab
BB	7.8 a	23.3 a	2.48 a	9 bc
Effect Probability > F				
Biochar	<0.05	<0.001	<0.05	<0.05

^{*}PB, pear branch biochar; RB, rice hull biochar; BB, bean straw biochar

^{**}Data followed by different lowercase letters indicate significant carbonized biomass effect at $\alpha=0.05$.

3.2. CO_2 배출특성

CO_2 배출량은 항온배양 초기에 모든 처리구에서 높았으며 (Fig. 1), 항온배양 1일째 콩대 바이오차가 투입된 처리구에서 $45.8 \text{ g CO}_2\text{/m}^2\text{/day}$ 로 가장 높았다. 3일째부터 대조구에서 가장 높은 CO_2 발생을 나타냈으며, 대조구에서 3, 6 그리고 15일째 각각 17.3, 8.3 그리고 $4.2 \text{ g CO}_2\text{/m}^2\text{/day}$ 으로 발생하였다. 31일 이후부터 모든 처리구에서 $2 \text{ g CO}_2\text{/m}^2\text{/day}$ 이하로 기저 발생 흐름을 나타냈다. CO_2 발생흐름은 처리구별 차이는 없었지만, 발생량은 각각 차이가 발생하여, 58일째 누적 CO_2 배출량은 Control, PB, RB 그리고 BB 처리구에서 각각 258.6, 225.7, 207.1 그리고 $255.2 \text{ g CO}_2\text{/m}^2$ 이었다.

3.3. N_2O 배출특성 및 무기태질소 함량 변화

N_2O 배출량은 항온배양 7일째 급격히 배출되었으며, Control, PB, RB 그리고 BB 처리구에서 각각 240.6, 71.3, 65.4 그리고 $56.8 \text{ mg N}_2\text{O/m}^2\text{/day}$ 의 N_2O 가 배출되었다 (Fig. 2). 항온배양 37일 이후부터는 모든 처리구에서 N_2O 는 발생하지 않았다. 58일째 누적 N_2O 배출량은 Control, PB, RB 그리고 BB 처리구에서 각각 2,890.6, 525.2, 443.1 그리고 $379.7 \text{ mg N}_2\text{O/m}^2$ 이었다. 항온시험 기간동안 토양내 질소순환 과정을 파악하기 위해 토양 내 무기태질소 함량 변화를 측정하였고 결과는 Fig. 3과 같다. NH_4^+ 은 23.7~83.3 mg/kg의 범위로 발생하였고, 처리구별 차이가 발생하지 않았다. 37일째를 제외하고 30일 이후

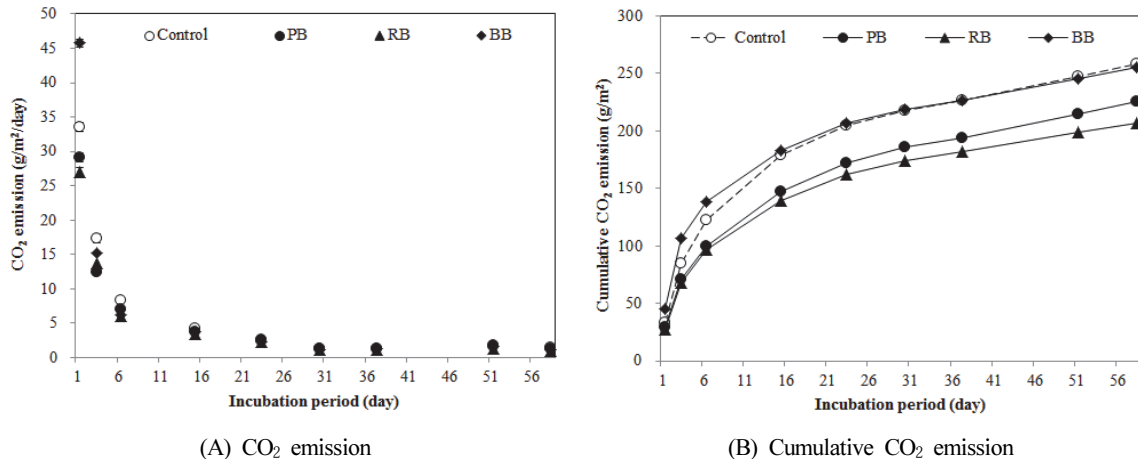


Fig. 1. (A) CO₂ emission and (B) Cumulative CO₂ emission by various biochars application under closed chamber condition. Vertical bars are standard errors of the means (n=3).

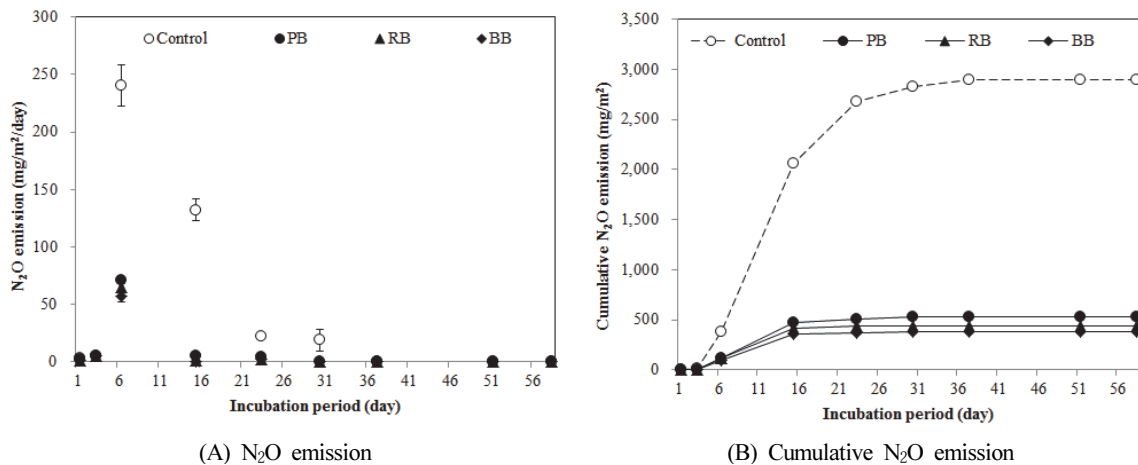


Fig. 2. (A) N₂O emission and (B) Cumulative N₂O emission by various biochars application under closed chamber condition. Vertical bars are standard errors of the means (n=3).

73.8~83.3 mg/kg으로 높은 상태를 나타냈다. NO₃⁻ 함량은 측정 기간동안 대조구에서 함량이 가장 낮았다. 대조구 처리구를 제외하고 23일되는 시점까지 NO₃⁻ 함량은 꾸준히 증가하였고 23일째 NO₃⁻의 함량은 Control, PB, RB 그리고 BB 처리구에서 각각 458.0, 1,117.9, 1,057.0 그리고 917.2 mg/kg 이었다.

4. 고 찰

바이오차를 투입하지 않은 Control구의 총 탄소함량은 16.0 g/kg이고, 바이오차가 투입된 PB, RB 그

리고 BB 처리구에서 매우 유의하게 차이를 나타냈으며 (p<0.001), 각각 6.5, 7.6 그리고 7.3 g/kg 증가하였다 (Table 3). 토양에서 발생하는 CO₂는 토양 탄소 함량이 높을수록 source가 증가하여 CO₂발생량이 증가할 것으로 예상되지만, 본연구의 누적 CO₂ 배출량은 3.5~51.5 g/m² 감소하였다 (Fig. 1). 바이오차 투입에 의해 증가된 토양탄소함량은 CO₂ 배출에 영향을 주지 않은 경향을 나타냈다 (Fig. 1). 즉 바이오차는 생물학적 분해의 영향을 받지 않는 난분해성 물질이기 때문에¹⁶⁾⁻¹⁷⁾, 탄소함량은 증가하였지만 분해되지 않아 직접적인 CO₂ 배출에 영향을 주지 않았다. 또한, 물질의 H/C 비율은 분자의 방향적 사슬구조를

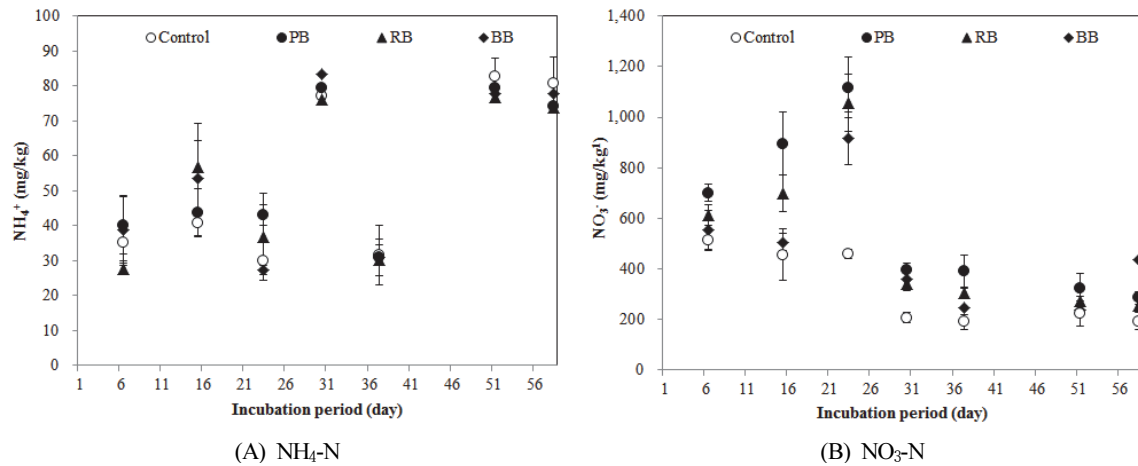


Fig. 3. Changes of (A) $\text{NH}_4\text{-N}$ and (B) $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration by various biochars application under closed chamber condition. Vertical bars are standard errors of the means (n=3)

파악할 수 있는 척도로 사용할 수 있으며, 국제 바이오차협회 (IBI; International Biochar Initiative)에서는 H/C 비율이 0.7이하일 경우에만 100년 이상 분해되지 않고 저장할 수 있다고 하며¹⁸⁾, 본 연구에 사용한 바이오차의 H/C 비율은 0.31~0.53임으로 (Table 2) 매우 안정적인 바이오차내의 탄소는 분해과정을 통한 CO_2 배출에 영향을 주지 않았음을 확인할 수 있다.

토양에서 배출되는 N_2O 는 탈질 및 질산화작용 등의 토양질소의 변동과 유기물의 분해가 영향을 미친다¹⁹⁾. 토양공극 수분함량이 60% 이상인 상태에서는 주로 탈질을 통해 N_2O 가 배출된다²⁰⁾. 본 연구결과로써 토양에서 배출되는 N_2O 는 바이오차가 투입되면 감소하였으며, PB, RB 그리고 BB 처리구에서 대조구 대비 누적 N_2O 발생량이 각각 81.8, 84.7 그리고 86.9% 감소하였다 (Fig. 2). 원료가 다른 바이오차의 T-C, T-N, T-H 그리고 비표면적 등의 각각 다른 세부적인 특징을 나타냈지만 (Table 2), 모든 바이오차 처리구에서 N_2O 를 감축시켰다. 바이오차를 투입함에 따라 T-C 함량이 증가하였고, 그에 따라 토양의 C/N 율이 증가하여 (Table 3) 질소의 부동화에 의해 N_2O 배출이 영향을 받았다고 판단된다²¹⁾. 또한 항온기간 중 토양 내 질소 순환과정 중 바이오차가 투입됨에 따라 질산화 과정이 촉진되었다 (Fig. 3). 특히 NO_3^- 함량은 질산화가 최대로 일어난 시점인 항온배양 23일 때 PB, RB 그리고 BB 처리구에서 대조구 대비 각각 144.1, 130.8 그리고 100.3% 높았

으며, N_2O 마지막으로 배출되는 시점과 동일하였다 (Fig. 2). N_2O 발생은 NO_3^- 함량과 관련이 크며²²⁾, 항온배양기간 중 NO_3^- 의 증가는 질산화과정이 우세하였다. 즉 토양내 통기성을 개선하여 탈질을 통해 배출되는 N_2O 의 배출 기작에 영향을 주어 토양에서 발생하는 N_2O 가 감소하였다고 판단된다. 그리고 N_2O 로 대기 중으로 배출되는 질소원을 줄여 토양내 질소 이용 효율을 증대할 수 있어 작물 생산에 긍정적인 영향을 줄 수 있는지를 평가하는 연구도 앞으로 필요할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구는 농가에서 버려지는 부산물을 바이오차로 변환한 후 토양에 적용하여 토양의 화학적 특성 변화와 온실가스 발생량을 비교하였다. 바이오차의 활용은 세 가지의 장점이 있었다. 첫 번째 버려지는 자원을 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. 특히 연구결과 N_2O 를 80% 이상 감축할 수 있어 바이오차를 활용한다면 농경지에서 발생하는 온실가스를 줄이는 획기적인 재료로 활용할 수 있을 것이다. 따라서 온실가스 감축기작을 정확히 파악하고 이를 활용할 수 있도록

질소순환과 연계된 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업 (과제번호: PJ01261403)의 지원에 의해 이루어진 것임.

References

1. Park, W. K., Park, N. B., Shin, J. D., Hong, S. G. & Kwon S. I., "Estimation of biomass resource conversion factor and potential production in agricultural sector", *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 30(3), pp. 252~260. (2011).
2. Zhang, X., Kondragunta, S., Schmidt, C. & Kogan, F., "Near real time monitoring of biomass burning particulate emissions (PM_{2.5}) across contiguous United States using multiple satellite instruments", *Atmospheric Environment*, 42(29), pp. 6959~6972. (2008).
3. Lehmann, J. and Joseph, S., "Biochar for environmental management: an introduction. In: Lehmann J, Joseph S (eds) *Biochar for environmental management: science and technology*", Earthscan, London, pp. 1~12, (2009).
4. Mathews, J. A., "Carbon-negative biofuels", *Energy Policy*, 36(3), pp. 940~945. (2008).
5. Lehmann, J., "Biological carbon sequestration must and can be a win-win approach", *Climate Change*. 97(3), pp. 459~463. (2009).
6. Singh, B. P., Cowie A. L. and Smernik, R. J., "Biochar carbon stability in a clayey soil as a function of feedstock and pyrolysis temperature", *Environmental Science and Technology*, 46(21), pp. 11770-11778. (2012).
7. Larid, D., Fleming, P., Wang, B. Q., Horton, R. and Karlen, D., "Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil", *Geoderma*, 158(3), pp. 436~442. (2010).
8. Yanai, Y., Toyota, K. and Okazaki, M., "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), pp. 181~188. (2007).
9. Cheng, Y., Cai, Z. C., Chang, S. X., Wang, J. and Zhang, J. B., "Wheat straw and its biochar have contrasting effects on inorganic N retention and N₂O production in a cultivated black chernozem", *Biology and Fertility of Soils*, 48(8), pp. 941~946. (2012).
10. Singh, B. P., Hatton, B. J., Singh, B., Cowie, A. and Kathuria, A., "Influence of biochars on nitrous oxide emission and nitrogen leaching from two contrasting soils", *Journal of Environmental Quality*. 39(4), pp. 1224~1235. (2009).
11. Lee, S. I., Lee J. S., Kim G. Y., Choi, E. J., Suh S. U. and Na U. S., "Effect of carbonized biomass derived from pruning on soil carbon pools in pear orchard", *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 35(3), pp. 159~165. (2016).
12. Lee, S. I., Kim G. Y., Choi, E. J., Lee J. S. & Jung H. C., "Decreases nitrous oxide emission and increase soil carbon via carbonized biomass application of orchard soil", *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 36(2), pp. 73~79. (2017).
13. Gee, G. W. and Bauder, J. W., "Particle size analysis. Physical and mineralogical methods", *American Society of Agronomy and Soil Science Society of America*, pp. 383~412. (1986).
14. NIAS., "Methods of soil and plant analysis", National Institute of Agricultural Sciences, RDA, (2000).
15. Zeng, W., Xu, C., Wu, J., Huang, J. and Ma, T., "Effect of salinity on soil respiration and nitrogen dynamics", *Ecological Chemistry and Engineering S.*, 20(3), pp. 519~530. (2013).
16. Nichols G. J., Cripps, J. A., Collinson, M. E. and

- Scott, A. D., "Experiments in waterlogging and sedimentology of charcoal: Results and implications", *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 164(1), pp. 43~56. (2000).
17. Ascough, P. L., Sturrock, C. J. and Bird, M. I., "Investigation of growth responses in saprophytic fungi to charred biomass", *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 46(1), pp. 64~77. (2010).
18. International Biochar Initiative (IBI), "Standard test method for estimating biochar carbon stability", (2013).
19. Khalil, M. I., Hossain, M. B. and Schmidhalter, U., "Carbon and nitrogen mineralization in different upland soils of the subtropics treated with organic materials", *Soil Biology and Biochemistry*, 37(8), pp. 1507~1518. (2005).
20. Dalal, R. C., Wang, W., Robertson, G. P. and Parton, W. J., "Nitrous oxide emission from Australian agricultural lands and mitigation options: a review", *Soil Res.* 41, pp. 165~195. (2003).
21. Cayuela, M. L., Van Zwieten, L., Singh, B. P., Jeffery, S., Roig, A. and Sánchez-Monedero, M. A., "Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: A review and meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 191, pp. 5~16. (2014).
22. Wang, N., Chang, Z., Xue, X., Yu, J., Shi, X., Ma, L. and Li, H., "Biochar decreases nitrogen oxide and enhances methane emissions via altering microbial community composition of anaerobic paddy soil", *Science of The Total Environment*, 581, pp. 689~696, (2017).