

바이오차르 토양투입에 따른 온실가스 발생 변화 연구

유가영* · 손용익 · 이승현 · 유예나 · 이상학¹

경희대학교 공과대학 환경학 및 환경공학과

¹국립축산과학원, 초지사료과

Greenhouse Gas Emissions from Soils Amended with Biochar

Gayoung Yoo*, Yongik Son, Seung Hyun Lee, Yena Yoo and Sang Hak Lee¹

*Department of Environmental Science and Engineering College of Engineering,
Kyung Hee University, Gyeonggi-do, Korea*

¹*Grassland and Forage Crops, Division in National Institute of Animal Science,
Cheonan, Chungnam, Korea*

Abstract - Biochar amendment to agricultural soil is regarded as a promising option to mitigate climate change and enhance soil quality. It could sequester more carbon within the soil system and increase plant yield by changing soil physicochemical characteristics. However, sustainable use of biochar requires comprehensive environmental assessment. In this sense, it is important to measure additional greenhouse gas emission from soils after biochar addition. We investigated emissions of CO₂, N₂O, and CH₄ from incubated soils collected from rice paddy and cultivated grassland after amendment of 3% biochar (wt.) produced from rice chaff. During incubation, soils were exposed to three wet-dry cycles ranging from 5~85% soil gravimetric water content (WC) to investigate the changes in effect of biochar when influenced by different water levels. The CO₂ emission was reduced in biochar treatment compared to the control at WC of 30~70% both in rice paddy and grassland soils. This indicates that biochar could function as a stabilizer for soil organic carbon and it can be effective in carbon sequestration. The N₂O emission was also reduced from the grassland soil treated with biochar when WC was greater than 30% because the biochar treated soils had lower denitrification due to better aeration. In the rice paddy soil, biochar addition resulted in decrease in N₂O emission when WC was greater than 70%, while an increase was noted when WC was between 30~70%. This increase might be related to the fact that available nutrients on biochar surface stimulated existing nitrifying bacterial community, resulting in higher N₂O emission. Overall results imply that biochar amendment to agricultural soil can stabilize soil carbon from fast decomposition although attention should be paid to additional N₂O emission when biochar addition is combined with the application of nitrogen fertilizer.

Key words : biochar, soil water content, greenhouse emission, aeration

* Corresponding author: Gayoung Yoo, Tel. 031-201-3858,
Fax. 031-203-4589, E-mail. gayoo@khu.ac.kr

서 론

바이오차르탄 유기물을 열분해하여 얻은 물질을 총칭하는데, 이는 유기물에 비하여 잘 분해되지 않으므로 이를 토양에 투입하였을 때 바이오차르에 포함된 탄소가 장기간 저장될 수 있어서 기후변화 완화 효과를 갖는다고 알려져 있다 (Goldberg 1985; Lehmann *et al.* 2006). 한편 이러한 바이오차르를 농경 토양에 투입하였을 때 기후변화 완화 효과 이외에도 pH 증가, 양이온 치환 능력 증대, 질소 비료이용 효율 증가, 미생물 활성도 증가 등 여러 긍정적 효과가 보고되고 있다 (Novak *et al.* 2009; Laird *et al.* 2010). 그러나 이와 같은 바이오차르의 긍정적 효과들은 미처 알려지지 못한 다른 효과들과 함께 평가해야 하는데, 그 중의 하나가 바이오차르 토양 투입에 따른 온실가스의 발생이다.

바이오차르 토양투입에 따른 온실가스 발생은 토양 및 바이오차르의 종류에 따라 달라진다고 보고되었다 (Van Zwieten *et al.* 2009; Spokas and Reicosky 2009; Lehmann *et al.* 2010). Yanai *et al.* (2007)은 실험실에서 토양에 바이오차르를 투입하였을 때 아산화질소 발생이 감소하였다고 보고하였고, Rondon *et al.* (2006) 또한 평균 14 t ha^{-1} 의 바이오차르를 열대 토양에 투입하였을 때 유의한 아산화질소 발생의 감소를 관찰하였다. 반면 Sing *et al.* (2009) 및 Yoo *et al.* (2011)은 바이오차르가 투입된 토양에서 아산화질소 발생의 증가를 보고하였는데, 이는 바이오차르에 포함된 가용한 질소 성분 때문이라 설명하였다. 메탄의 발생도 바이오차르 투입에 따라 변화하고 있음이 보고되었는데, Rondon *et al.* (2005) 및 Karhu *et al.* (2011)은 토양에 바이오차르를 투입하여 유의한 메탄발생의 감소를 관찰하였다.

이와 같이 바이오차르가 토양에 투입되어 온실가스 배출의 변화를 가져오게 되는 이유는 매우 다양하고 복잡한데, 그 중 가장 큰 영향을 미치는 것 중 하나는 토양 수분의 변화이다. 바이오차르는 그 자체가 다공성으로 토양에 투입되었을 때 수분보유력을 증대시키기도 하고 통기성을 개선시키기도 한다고 알려져 있다. 이에 따라 Yanai *et al.* (2007)은 총 공극부피의 73%에 해당하는 수분이 토양에 존재할 때에는 바이오차르 투입된 토양에서 아산화질소 발생이 감소되었으나 총공극부피의 83%가 물로 채워진 경우 바이오차르 투입 토양에서 오히려 더 많은 아산화질소가 발생되었다고 보고하였다. 메탄의 발생 또한 토양 수분함량에 따라 영향을 받았는데, Karhu *et al.* (2011)이 보고한 바이오차르 투입에 따른 메탄 발

생의 감소는 토양 내 통기성이 바이오차르에 의해 개선되었기 때문에 메탄의 발생 대신 메탄의 산화가 증가된 것으로 설명하였다.

토양에서 아산화질소의 발생은 수분조건 이외에도 토양 내 가용한 무기태 질소 및 탄소의 양에도 큰 영향을 받는다 (Batesman and Baggs 2005). 일반적으로 바이오차르는 열분해 결과물로서 생물학적 과정에 영향을 크게 받지 않는 난분해성 물질로 알려져 있으나 (Nichols *et al.* 2000; Ascough *et al.* 2010), 열분해 부산물인 바이오 오일 등 미생물이 이용가능한 성분들이 바이오차르 표면에 존재하고 있어 바이오차르가 미생물 생장을 촉진하거나 활성도를 증대시킨다는 보고도 활발하다 (Ogawa 1994; Steiner *et al.* 2008; Clough *et al.* 2010; Spokas *et al.* 2010). 아산화질소 발생은 토양이 혐기 조건일 경우 불완전 탈질에 의한 기작과 호기 조건일 경우 질산화 과정에 의한 기작이 종합적으로 작용하여 일어나는 현상인데, 종합하자면, 바이오차르의 토양 투입은 토양의 수분 조건의 변화를 가져오고 동시에 토양 내에 가용한 탄소 및 질소의 공급을 가져올 수 있으므로 아산화질소는 바이오차르의 투입에 의해 그 발생이 변화될 것이라 예상할 수 있다.

토양에서의 메탄 발생은 메탄 생성균에 의한 메탄 발생과 메탄 산화균에 의한 메탄 흡수 간의 차이로 설명되는데, 메탄 생성균의 경우는 절대 혐기조건에서 활동하고 메탄 산화균은 호기 조건에서 성장한다. 즉, 메탄의 발생에도 토양의 수분조건은 매우 중요하며 바이오차르의 토양 투입을 통해 토양의 수분조건이 변화하는 바, 바이오차르 토양 투입에 따라 메탄의 발생도 변화할 것이라 예상된다.

이런 배경 하에 본 연구의 목적은 농경 토양에 바이오차르를 투입한 후 토양에 건습 주기를 주어 수분함량이 변화함에 따라 온실가스 발생의 변화를 알아보는 것이다. 이를 통하여 동일한 수분조건이 유지되는 실험실 배양에서 산출된 결과의 한계를 보완할 수 있고, 바이오차르가 야외에 투입되었을 때의 온실가스 배출의 변화를 예상할 수 있을 것으로 기대된다.

재료 및 방법

1. 토양 및 바이오차르 준비

토양은 2010년 4월 충남 천안시 서북구 성환읍에 위치한 국립축산과학원 내 시험지의 논과 초지의 표토(0~10 cm)를 채취하였다. 실험실에서 토양은 일주일간 풍건한 후 2 mm 체에 걸러 준비하였다. 기초 토양분석은 토성

(hydrometer 법), pH (1:1 soil to water), 총탄소 및 질소, 입자상 탄소 및 질소, 암모늄태 및 질산태 질소를 측정하였다. 입자상 물질은 Wander *et al.* (1998)에 따라 풍건 토양 10 g을 5% Na HMP (Sodium hexametaphosphate, $\text{Na}_6\text{O}_{18}\text{P}_6$)로 분산시킨 후 53 μm 에 걸러 분리하였다. 총 및 입자상 탄소 및 질소는 원소분석기 (Carlo Erba NS 1500 C/N analyzer, Milan, Italy)로 분석하였고, 암모늄태 및 질산태 질소는 salicylate microplate 법을 활용하였다 (Sims *et al.* 1995).

본 연구에 사용한 바이오차르는 강진 농협에서 판매하는 상품이며 5 mm 이하로 분쇄한 왕겨를 열분해 반응기 (DCH-400)에 넣어 500~600°C에서 약 20분간 열분해하였다. 반응기의 크기는 1.4 m*5.2*5 m (L*W*H)이며 시간당 처리되는 왕겨의 양은 400 kg이다. 바이오차는 pH (1:5 soil to water), 총탄소 및 질소 함량, 그리고 입자크기 분석을 수행하였다. 입자크기 분포는 입도분석기 (Master-sizer-S: Malvern Instruments, Herenberg, Germany)로 분석하였다.

2. 실험 계획 및 토양 배양

처리구는 바이오차르 투입 (char/nilchar) 및 질소 비료 투입 (fert/nilfert) 두 요인을 요인설계 (factorial design)하고 모든 처리를 삼반복하였다. 바이오차르 투입은 지름 9.4 cm 높이 11.0 cm의 용기 (Lock and Lock, Korea)에 논 및 재배 초지에서 채취한 풍건 토양 200 g을 넣고 이에 바이오차르를 무게 기준으로 3% 투입하였으며, 질소비료 투입은 관행농법에 따라 100 kg N ha⁻¹의 NH₄Cl을 액상 형태로 투입하였다.

토양 수분은 각 용기에 토양 단위 무게당 수분함량이 85% 되도록 증류수를 첨가하고 용기의 뚜껑을 덮지 않아 수분함량이 30%로 건조될 때까지 방치한 후 다시 85%로 맞추어 주는 건습 주기 (dry-wet cycle)를 3회 반

복하였다. 배양은 총 28일 동안 지속되었다.

3. 기체 및 토양 분석

각 건습 주기 동안 매번 3회의 기체 채취를 진행하였는데, 기체의 채취는 용기를 뚜껑으로 덮어 30분 동안 밀폐시키고 용기에 부착된 septum을 통해 10 mL 주사기로 기체를 채취하여 이를 ECD와 FID가 장착된 가스 크로마토그래피 (Agilent 7890A, USA)로 분석함으로써 밀폐된 시간동안 발생 혹은 흡수된 아산화질소 및 메탄의 양을 정량하였다. 기체발생량의 계산은 아래의 식을 따랐다.

$$\text{Flux} = \text{ppm} \times \rho \times v \times \frac{1}{A} \times \frac{273}{273+T}$$

여기서 ρ 는 해당기체의 밀도, v 는 용기의 부피, A 는 용기의 밀면적, T 는 절대온도이다.

4. 통계분석

통계분석은 SAS 9.2의 MIXED 과정을 이용하여 수행하였다 (SAS Institute 2008). 처리구별 평균적 차이는 분산분석 (ANOVA)을 이용하였으며 날짜별 처리구별 차이는 least square mean을 이용하여 유의한 경우 다른 알파벳을 이용해 그래프에 표기하였다. 통계적 유의수준은 5%의 확률을 이용하여 검증하였다.

결과 및 토의

1. 토양 및 바이오차르 분석

배양에 이용된 논 및 재배초지의 토양 분석 결과, 두 토양 모두 사양토 (sandy loam)인 것으로 나타났다 (Table 1). 토양의 pH는 두 토양 모두 7.8로 산성화에 따른 영향

Table 1. Physicochemical analysis on soil and biochar

		Soil							
		pH	C/N	Total C	Total N	POMC	POMN	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻
		mg kg ⁻¹ soil							
Grassland	7.85 (0.02)	13.7 (0.15)	11.0 (0.19)	0.8 (0.09)	6.4 (0.01)	0.5 (0.01)	1.4 (0.09)	1.9 (0.14)	
Rice paddy	7.83 (0.02)	9.0 (0.21)	5.2 (0.17)	0.6 (0.06)	3.1 (0.01)	0.2 (0.02)	1.3 (0.12)	1.6 (0.16)	
		Biochar							
pH	Total C	Total N	Al	Ca	Fe	Mg	K	Na	P
		mg kg ⁻¹ soil							
10.3	42.9	1.1	521.4	2074	595.2	647.5	15950	329.5	1520

은 없는 걸로 나타났으며 논토양의 탄소함량은 5.2 mg kg^{-1} , 재배초지 토양의 탄소함량은 11.0 mg kg^{-1} 로 상대적으로 매우 낮은 수준이었다. 토양의 탄질비는 논토양의 경우 지속적 시비효과로 인하여 9.0 정도로 낮게 나타났고, 재배초지 토양의 탄질비는 13.7로 나타났다. 입자상 탄소는 초지 및 논 토양 모두에서 총 탄소의 약 58% 정도를 차지하고 있었는데, 이 비율은 타 연구에서 보고된 수치인 10~40% 범위 (Wander *et al.* 1998; Yoo *et al.* 2008)에 비하여 매우 높은 편으로, 그 이유는 본 연구토양의 유기물 함량이 낮아서 대부분의 유기물이 토양 내 부식질이 아닌 매년 새로 유입되는 식물체에 기인한 입자상으로 존재하기 때문인 것으로 사료된다.

바이오차르는 탄소함량이 약 42.9%이고 탄질비는 39.0으로서 비교적 낮은 수치를 보이고 있다. 본 연구에 사용된 바이오차르는 중금속 분석 결과 특정 중금속이 높은 수치로 존재하지 않으므로 토양 미생물에 유해한 영향은 없는 것으로 판단된다.

2. 이산화탄소의 발생

논 및 초지 토양에서 이산화탄소의 발생은 배양시작 후 22일째 자료를 제외하고는 토양 수분함량과 비슷한 패턴을 보였다(Fig. 1). 22일째 이산화탄소의 발생이 다른 측정일에 비하여 2배 이상 높은 이유는 기체포집 당시 배경 이산화탄소의 농도가 실내 온열기에 의한 영향으로 비정상적으로 증가하여 실내의 환기를 진행한 후 배경농도를 낮추었기 때문에 타 측정일과 비슷한 양의 이산화탄소가 생성되었어도 배출이 상대적으로 높게 계산되었기 때문인 것으로 파악된다. 토양으로부터 이산화탄소 발생은 논 토양에서 토양 수분함량이 30~70% 사이인 경우 바이오차르 투입 토양에서 유의하게 저감된 것을 볼 수 있다. 초지토양에서는 모든 토양 수분조건에서 바이오차르 투입시 유의한 저감을 보였다. 이는 Spokas *et al.* (2009)의 연구와도 일치하는 결과로써, 바이오차르가 토양에 투입되어 기존 토양유기탄소를 안정화시키는 경향이 있음을 알 수 있다. Amonette *et al.* (2003) 및 Zimmerman *et al.* (2011)의 연구에서도 바이오차르의 토양투입은 총 이산화탄소 발생을 저감시켰다. 반면, 바이오차르의 토양투입이 이산화탄소 발생을 증가시켰다는 보고도 많은데, Yoo *et al.* (2011)은 실험실 조건에서 초지토양에 축산분뇨로 만들어진 바이오차르를 투입하였을 때 초기 20일간 유의한 이산화탄소 발생의 증가를 가져왔음을 관찰하였다. Kolb *et al.* (2009) 역시 바이오차르 토양투입이 이산화탄소 발생을 증대시켰다고 보고하였는데, 이

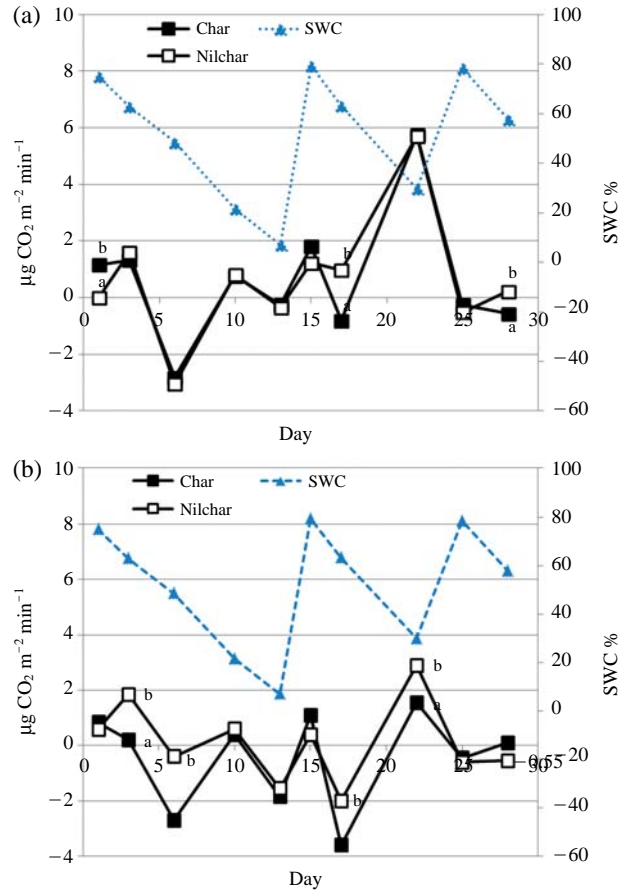


Fig. 1. Temporal change in CO₂ evolution from biochar added and control soils in a) Rice paddy and b) Cultivated grassland.

는 바이오차르 표면에 열분해 부산물인 바이오오일 등의 가용성 물질이 있어 이를 토양미생물들이 이용할 수 있기 때문이라 고찰하였다. 본 연구에서 사용된 왕겨 차르의 경우 탄질비가 39로서 다른 바이오차르 보다 매우 낮은 편으로 가용한 탄소 보다는 가용한 질소 함량이 더 많기 때문에 이의 투입에 따라 이산화탄소 발생이 증대되지 않고, 오히려 토양내 입단형성 촉진이나 여타 안정화 기작에 따라 (Yoo *et al.* accepted) 이산화탄소 발생은 감소한 것으로 사료된다.

3. 아산화질소의 발생

논 및 초지 토양에서 아산화질소의 발생은 토양 수분함량의 변화와 그 패턴을 같이 했으며 정의 상관관계를 보였다(Fig. 2).

논 토양에서는 아산화질소의 발생이 비료 투입구에서 높은 경향을 보였다 (data not shown). 토양에서의 아산화

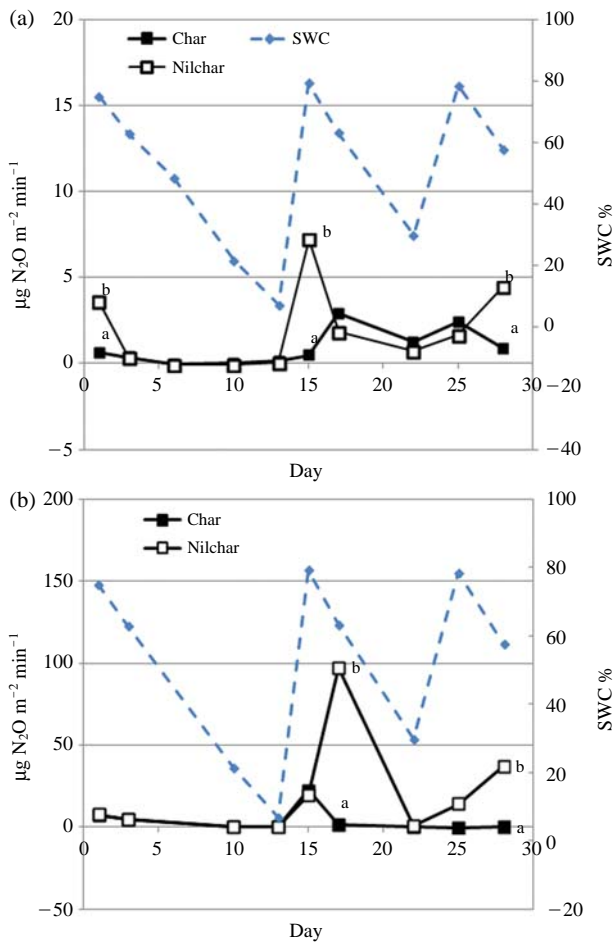


Fig. 2. Temporal change in N_2O evolution from biochar added and control soils in a) Rice paddy and b) Cultivated grassland.

질소 발생은 토양의 유효 탄소 및 질소 수준, 수분 상태, 토양 미생물 군집에 주요한 영향을 받는다고 알려져 있다. 토양에 비료를 투입한 경우 토양 내 유효 질소 농도는 무투입구에 비해 높으므로 이에 따른 아산화질소 발생도 높아진 것으로 설명된다. 논토양에서 바이오차르 효과는 비료를 처리한 경우와 처리하지 않은 경우 같은 경향을 보였다. 바이오차르 투입구에서의 아산화질소 발생은 토양내 수분함량이 높게 유지된 경우 (70% 이상) 바이오차르 무처리구에 비해 약 1/3배 가량 낮아진 반면, 수분함량이 70% 이하로 저감되면 바이오차르 투입구에서 오히려 더 높은 아산화질소가 발생되었음을 알 수 있었다 (Fig. 2a). 토양으로부터 발생하는 아산화질소의 원천은 혐기 조건에서의 탈질과정 및 호기조건에서의 질산화 과정인데, Bateman and Baggs (2005)은 토양 수분이 총공극부피의 70% 이상되는 경우 모든 아산화질소는 탈질과정에 의한 것이고 총공극부피의 35~60%가 수분

으로 채워진 경우에는 주요 원천이 질산화 과정에 의한 것이라는 사실을 ^{15}N 동위원소 추적을 통해 알아내었다. 이에 따르면 논토양에서 수분함량이 70% 이상인 경우는 모든 아산화질소가 탈질과정에 의한 것이라 가정할 수 있고, 바이오차르가 투입되면 토양 내 통기성이 개선되어 혐기조건이 약해지므로 탈질과정에 의한 아산화질소 발생이 저감되었다고 설명할 수 있다. 이 연구결과는 Yanai *et al.* (2007)의 결과와 일치하는데, 이들은 토양의 수분함량이 총공극부피의 73%인 경우 바이오차르 투입이 아산화질소 발생을 저감시켰다고 보고하였다. 그러나 수분함량이 70% 이하인 경우 아산화질소의 원천은 탈질과정 및 질산화 과정을 모두 포괄하기 때문에 바이오차르가 투입되어 토양 통기조건이 개선된다 하여도 탈질과정에 의한 아산화질소 발생 저감 효과가 질산화 과정에 의한 아산화질소 발생 효과와 함께 나타나므로 바이오차르 투입에 따라 오히려 더 높은 아산화질소의 발생을 가져온 것으로 사료된다. 이는 바이오차르 표면의 가용한 질소원으로 인해 기존에 존재하던 질산화 박테리아 군집이 활성화되어 아산화질소 생성을 촉진한 것이다. 이와 같은 연구결과는 Yoo *et al.* (2011), Singh *et al.* (2009), Chan *et al.* (2008) 등의 연구결과와도 일치한다.

한편, 초지 토양의 경우는 우선 바이오차르 투입에 따른 아산화질소 발생 저감효과가 질소비료를 투입한 토양에서만 나타났고, 그 효과는 토양 수분함량이 70% 이상인 경우뿐 아니라 30~70%의 경우에서도 나타났다 (Fig. 2b). 논 토양에서의 질소시비는 일반적으로 초지에 비해 그 수준이 높고 생육기간 동안 토양에 물이 포화되어 있으므로 탈질 세균의 군집이 잘 발달되어 있다 할 수 있다. 그러므로 실험실 배양조건에서 질소 비료를 투입하지 않아도 기존 탈질세균의 활동에 의한 아산화질소 배출이 활발하고 이에 따른 바이오차르 효과도 질소 비료 처리와 무관하게 나타났다고 보여진다. 그러나 초지의 경우 질소 시비량도 논에 비해 낮고 토양 수분은 낮은 수준으로 유지되므로 탈질세균 군집의 발달이 논에 비해 미약하다. 이 때문에 실험실 배양조건에서는 질소 비료가 투입된 처리구에서만 바이오차르 투입에 의한 아산화질소 발생 억제효과가 유의하게 관찰되는 것이라 할 수 있다. 토양 수분함량이 70% 이상으로 높은 경우 아산화질소 발생이 저감되는 이유는 논토양과 동일한 설명이 가능하다. 토양 수분이 30~70%으로 저감된 경우, 이는 질산화에 의한 아산화질소 발생도 충분히 일어나는 조건인데, 논토양에 비해 초지토양에는 질산화 세균 군집의 발달이 미약하고 유효 질소가 투입되었다고 하여도 질산화 세균이 자극을 받아 아산화질소 발생을 촉진시키

는 기작이 우세하지 않다고 볼 수 있다. 그러므로 초지 토양에서는 토양수분조건이 30~70% 경우에서도 바이오차르 투입에 따라 탈질과정에 의한 아산화질소 발생 저감만이 유의하게 관찰되는 것이라 할 수 있다. 이와 같은 연구결과는 Rondon *et al.* (2005), Clough *et al.* (2010)와도 일치한다.

4. 메탄의 발생

토양에서의 메탄 발생은 논 및 초지토양 모두에서 바이오차르나 질소비료 시비에 따라 유의한 영향을 받지 않았다. 이는 같은 토양에 본 연구에서 사용한 왕겨 차르 대신 축산분뇨 및 보리 짚으로 만든 차르를 투입하여 배양한 Yoo *et al.* (2011)의 실험결과와 일치하지 않는 결과이다. Yoo *et al.* (2011)의 연구에서는 축산분뇨를 만든 바이오차르를 논 및 초지 토양에 투입하였을 때 유의한 메탄 발생의 감소를 관찰하였다. 메탄의 발생은 완전 혐기 조건에서 일어나는 것으로써 본 연구에서는 토양수분 함량이 70% 이상인 경우에서만 메탄발생이 일어날 것으로 예상하였는데, 높은 수분조건에서도 메탄이 발생되지 않은 이유는 Yoo *et al.* (2011)의 연구와 달리 배양기간 동안 토양은 밀폐용기가 아닌 뚜껑이 덮이지 않은 상태였고, 이에 따라 토양 공극에는 충분한 양의 공기가 이출입하여 완전한 혐기조건의 생성이 되지 않았기 때문이라 할 수 있다. Rondon *et al.* (2005) 및 Karhu *et al.* (2011)의 연구에서는 바이오차르 투입 토양으로부터 메탄 발생의 저감을 관찰하였는데 이를 통기성의 증가로 인한 메탄 생성의 감소로 설명하였다. 그러나 아직 바이오차르 투입에 따른 메탄 발생의 변화 기작은 명확하게 밝혀져 있지 않다. 바이오차르가 메탄 산화를 촉진하였을 수도 있고, 발생된 메탄이 바이오차르 표면에 흡착되었을 가능성도 배제할 수 없다 (Belmabkhout *et al.* 2009). 이를 명확히 하기 위해서는 메탄 생성 및 산화 박테리아에 관한 동정 및 흡착에 대한 연구가 진행되어야 한다.

사 사

본 논문은 농촌진흥청 어젠다사업 (과제번호: PJ00925 3022013)의 지원에 의해 이루어진 것임.

REFERENCES

Amonette JE, J Kim, CK Russell, AV Palumbo and WL Daniels.

2003. Enhancement of soil carbon sequestration by amendment with fly ash. In: Proceedings 2003 International Ash Utilization Symposium. Lexington, Kentucky, Paper #47.
- Ascough PL, CJ Sturrock and MI Bird. 2010. Investigation of growth responses in saprophytic fungi to charred biomass. *Isotopes Environ. Health Stud.* 46:64-77.
- Bateman EJ and EM Baggs. 2005. Contributions of nitrification and denitrification to N₂O emissions from soils at different water-filled pore space. *Biol. Fertil. Soils* 41:379-388.
- Belmabkhout Y, R Serna-Guerrero and A Sayari. 2009. Adsorption of CO₂ from dry gases on MCM-41 silica at ambient temperature and high pressure. 1: Pure CO₂ adsorption. *Chem. Eng.* 64:3721-3728.
- Chan KY, L Van Zwieten, I Meszaros, A Downie and S Joseph. 2008. Using poultry litter biochars as soil amendments. *Aust. J. Soil Res.* 46:437-444.
- Clough TJ, JE Bertram, JL Ray, LM Condrón, M O'Callaghan, RR Sherlock and NS Wells. 2010. Unweathered wood biochar impact on nitrous oxide emissions from a bovine-urine-amended pasture soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 74:852-860.
- Goldberg ED. 1985. Black carbon in the environment: Properties and distribution. John Wiley & Sons, New York.
- Karhu K, T Mattila, I Bergstrom and K Regina. 2011. Biochar addition to agricultural soil increased CH₄ uptake and water holding capacity-Results from a short-term pilot field study. *Agr. Ecosyst. Environ.* 140:309-313.
- Kolb SE, KJ Fermanich and ME Dornbush. 2009. Effect of charcoal on microbial biomass and activity in temperate soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73:1173-1181.
- Laird D, P Fleming, BQ Wang, R Horton and D Karlen. 2010. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. *Geoderma* 158:436-442.
- Lehmann J, J Gaunt and M Rondon. 2006. Biochar sequestration in terrestrial ecosystems: A review. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change.* 11:403-427.
- Lehmann J, D Guereña, K Hanley, C Hyland, A Enders and S Rajkovich. 2010. Environmental effects of biochars from agricultural wastes: Nutrient leaching, denitrification, and plant growth. ASA-CSSA-SSA 2010 International Annual Meetings. Long Beach, U.S.A.
- Nichols GJ, JA Cripps, ME Collinson and AD Scott. 2000. Experiments in waterlogging and sedimentology of charcoal: Results and implications. *Paleogeogr. Paleoclimatol. Paleocol.* 164:43-56.
- Novak JM, WJ Busscher, DL Laird, M Ahmedna, DW Watts and MAS Niandou. 2009. Impact of biochar amendment on fertility of a Southeastern coastal palin soil. *Soil Sci.* 174: 105-112.
- Ogawa M. 1994. Symbiosis of people and nature in the tropics.

- Farming Japan 28:10-34.
- Rondon MA, J Ramirez and J Lehmann. 2005. Greenhouse gas emissions decrease with charcoal additions to tropical soils. p.208. In Proceedings of the Third USDA Sequestration, Soil Carbon Center, Kansas State University, United States Department of Agriculture, Baltimore, USA.
- SAS Institute. 2008. SAS User's Guide. SAS Institute Inc. Cary, NC.
- Sims GK, TR Ellsworth and RL Mulvaney. 1995. Microscale determination of inorganic nitrogen in water and soil extracts. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 26:303-316.
- Singh BP, BJ Hatton, B Singh, A Cowie and A Kathuria. 2009. Influence of biochars on nitrous oxide emission and nitrogen leaching from two contrasting soils. *J. Environ. Qual.* 39: 1224-1235.
- Spokas KA and DC Reicosky. 2009. Impacts of sixteen different biochars on soil greenhouse gas production. *Ann. Environ. Sci.* 3:179-193.
- Spokas KA, JM Baker and DC Reicosky. 2010. Ethylene: potential key for biochar amendment impacts. *Plant Soil* 333:443-452.
- Steiner C, JC Das, M Garcia, B Forster and W Zech. 2008. Charcoal and smoke extract stimulate the soil microbial community in a highly weathered xanthic Ferralsol. *Pedobiologia* 51:359-366.
- Van Zwieten L, B Singh, S Joseph, S Kimber, A Cowie and KY Chan. 2009. Biochar and emission of non-CO₂ greenhouse gases from soil. p.227-249. Biochar for environmental management (Lehmann J and S Joseph eds.). Science and technology. Earthscan. Gateshead, UK.
- Wander MM, BG Bidart and S Aref. 1998. Tillage impacts on depth distribution of total and particulate organic matter in three Illinois soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62:1704-1711.
- Yanai Y, K Toyota and M Okazaki. 2007. Effects of charcoal addition on N₂O emissions from soil resulting from rewetting air-dried soil in short-term laboratory experiments. *Soil Sci. Plant Nutr.* 53:181-188.
- Yoo G and MM Wander. 2008. Tillage effects on aggregate turnover and sequestration of particulate and humified soil organic carbon. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72:670-676.
- Yoo G and H Kang. 2011. Effects of biochar addition on greenhouse gas emissions and microbial responses in a short-term laboratory experiment. *J. Environ. Qual.* 41:1193-1202.
- Yoo G, H Kim and Y Kim. (accepted). Effects of Biochar Addition on Nitrogen Leaching and Soil Structure Following Fertilizer Application to Rice Paddy Soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*
- Zimmerman AR, B Gao and MY Ahn. 2011. Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils. *Soil Biol. Biochem.* 43:1169-1179.

Received: 5 November 2013

Revised: 25 November 2013

Revision accepted: 26 November 2013