

논토양에서 바이오차르 투입 및 완효성비료 시용에 따른 메탄발생량과 작물생산량 변화

김대균 · 조광래 · 원태진 · 박인태 · 유가영^{1,*}

경기도농업기술원 작물연구과, ¹경희대학교 공과대학 환경학 및 환경공학과

Changes in Crop Yield and CH₄ Emission from Rice Paddy Soils Applied with Biochar and Slow-release Fertilizer

Daegyun Kim, Kwangrae Cho, Taejin Won, In-tae Bak and Gayoung Yoo^{1,*}

*Crop Research Division Gyeonggi-do Agricultural Research and Extension Services
283-33, Byeongjeomjungang-ro, Hwaseong-si, Gyeonggi-do, Korea*

¹*Department of Environmental Science and Engineering College of Engineering, Kyung Hee University*

Abstract - Emission reduction of CH₄ (methane gas) from rice paddy soil is a very important measure for climate change mitigation in agricultural sector. In this study, we investigated the changes in crop yield and CH₄ emissions in response to application of biochar and fertilizers. The experimental site is located in Hwasung, Kyunggi-do and experimental design is the split-plot method with three replicates. Treatments included rice straw (RS) and biochar (BC) amendments nested with the conventional NPK fertilizer (NPK) and slow release fertilizer (SRF). Control was also prepared with the soil with the conventional NPK fertilization with no amendment. Measurement of CH₄ emission was conducted during the growing season of 2014 using a dynamic chamber method. The results showed that application of rice straw increased daily CH₄ emission rate by 15%, while application of biochar reduced daily CH₄ emission rate by 38%. When we combined biochar application with slow release fertilizer, CH₄ emission was reduced by 45%. Further, the crop yield was also increased in all treatments compared with the control except for the treatment of rice straw application with slow release fertilizer. Overall results imply that biochar amendment to agricultural soil can be an effective strategy to decrease annual CH₄ emission with no reduction in crop yield.

Key words : biochar, slow release fertilizer, methane emission, crop yield

서 론

논토양에서 메탄발생은 농업부문 전체 온실가스 배출량의 약 5~30%를 차지하고 있다(Houghton *et al.* 1990).

토양에서의 메탄 발생은 절대 혐기조건에서 유기물이 메탄 생성균에 의해 분해되면서 일어나므로 논토양에서의 물관리 및 유기물 관리조건은 메탄발생에 있어서 주요한 인자로 작용한다(Le Mer and Roger 2001). 우리나라는 2020년까지 BAU (Business As Usual) 대비 30%의 온실가스 감축을 공표하였고 이에 따라 농업부문도 7.4%만큼의 배출량 저감을 이행해야 하므로 (RDA 2010) 논

* Corresponding author: Gayoung Yoo, Tel. 031-229-5788,
Fax. 031-203-4589, E-mail. gayoo@khu.ac.kr

토양에서의 메탄발생 저감기술의 개발은 국가적으로도 중요한 과제라 할 수 있다.

논토양에는 벧짚을 환원하거나 녹비작물을 재배함으로써 반복적 경작에 따른 토양의 질 저하를 방지하는 관리방법이 널리 적용된다 (Shin *et al.* 2003; Yang *et al.* 2010). 그러나 이러한 유기물의 투입은 재배기간중에 메탄발생의 증가를 가져오게 되므로 온실가스 저감 측면에서 순배출의 증가를 가져올 수 있다. 온실가스 배출을 저감하면서 동시에 토양 질의 개선을 가져올 수 있는 관리 방법으로 바이오차르라는 물질의 논토양 투입이 제안되고 있다 (Liu *et al.* 2011; Yu *et al.* 2013). 바이오차르란 유기물을 산소를 차단한 상태에서 열분해한 부산물을 말하는데, 바이오차르에 포함된 탄소는 화학적으로 매우 안정하여 미생물이 잘 분해하지 못하므로 탄소 저장효과를 갖고 있고, 바이오차르의 다공성 성질로 인해 오염물질이 흡착되어 정화효과를 보이기도 하며, 수분이나 비료 보유력이 증대되어 궁극적으로 작물의 생산성이 높아진다고 보고된다 (Lehmann *et al.* 2006; Novak *et al.* 2009; Laird *et al.* 2010). 바이오차르의 이러한 긍정적 효과와 더불어 추가적으로 바이오차르의 토양투입이 논토양에서 메탄발생을 저감하게 된다면 기후변화 완화와 생산성 증가를 동시에 기대할 수 있는 지속가능한 농업 관리 전략으로 자리잡을 수 있을 것이다.

바이오차르 투입에 따른 메탄발생의 변화는 Rondon *et al.* (2005) 및 Karhu *et al.* (2011) 등에 의해 보고되었는데, 이는 바이오차르를 토양에 투입함에 따라 토양의 수분보유력이 증대되고 이로 인해 동일한 수분함량에서도 호기성 공극이 많이 확보되어 호기성 메탄산화균의 활동이 증대된 것으로 설명하였다. 한편, 논토양에서 비료 사용에 따른 메탄발생량의 변화는 비료의 종류 및 시비량, 토양 유기물 함량 등에 따라 상이하게 보고되고 있다. Banger *et al.* (2012)은 155개의 논토양에서 질소비료 시비에 따른 메탄발생량의 변화를 정리한 메탄연구에서 1 kg 질소 투입당 약 $0.27 \text{ kgCH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ season}^{-1}$ 만큼 증가한다고 밝혔다. 질소비료 투입에 따른 토양 메탄발생량 증가 메커니즘으로는 두 가지를 제안하였는데, 하나는 메탄산화균이 분비하는 효소인 methane mono-oxygenase는 기질 특이성이 낮아 NH_3 및 NH_4^+ 을 산화하는 ammonium mono-oxygenase처럼 작용할 수 있으므로 (Hanson and Hanson 1996) 메탄의 산화가 저해되어 메탄발생이 증가하는 것이고, 다른 하나는 질소비료 사용에 따라 작물의 생산량이 증가하여 토양으로 유입되는 탄소기질의 양이 증가하므로 메탄생성균의 활성도가 촉진되는 것이다. Ko *et al.* (2002)의 연구에 따르면 요소, 유안, 완효성시

비의 세 가지 질소비료에 따른 메탄 배출량을 관찰했을 때 요소 시비구 대비 유안 시비구에서 메탄 배출량이 31.6%, 완효성시비 시비구에서 1.1% 감소하였다고 보고되었다. 또한 국립식량과학원에서 1998년에서 1999년 질소비료 종류별 메탄 배출량을 비교하기 위하여 요소, 황산암모늄, 완효성 비료를 각각 사용한 결과 요소 ($329 \text{ kg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$) > 황산암모늄 ($303 \text{ kg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$) > 완효성 비료 ($264 \text{ kg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$) 순으로 메탄 배출량이 변화하였다고 보고하였다.

본 연구에서는 논토양에 바이오차르 및 질소를 포함한 완효성화학비료를 사용함으로써 변화하는 메탄 발생량을 조사하였다. 메탄 발생량과 작물생산량의 변화를 함께 연구함으로써 실용적인 바이오차르 및 화학비료 관리방안을 제안할 수 있도록 하였다.

재료 및 방법

1. 시험장소 및 시험방법

본 연구는 경기도 화성시 기산동에 위치한 경기도농업기술원의 벧 재배시험 포장에서 수행하였다. 시험 전 토양 중의 유기물 (organic matter: OM) 함량은 Table 1에 서와 같이 22 g kg^{-1} 으로 벧 재배에 적당한 OM 함량인 $25 \sim 30 \text{ g kg}^{-1}$ (NIAST, 2010)에 비해 다소 낮았으며, 배수가 약간 불량인 미사질양토였다 (Table 1).

시험구의 면적은 $5.9 \text{ m} \times 31 \text{ m} = 182.9 \text{ m}^2$ 로 단구제로 배치하였으며, 구 당 메탄 포집용 챔버는 3반복으로 설치하였다. 시험에 사용한 벧 품종은 추청벼로써 4월 25일 종자를 파종하여 5월 25일에 $30 \text{ cm} \times 14 \text{ cm}$ 의 이앙거리로 기계이앙 하였다. 물관리는 수확 2주전까지 상시 담수를 유지하였다.

시험처리별 사용량은 ha 기준으로 1번 처리는 화학비료(대조구)로써 벧 재배 표준시비량의 3요소인 $\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O} = 90\text{-}45\text{-}57 \text{ kg}$ 에 해당량을 공통으로 사용하였으며, 2번 처리는 벧짚 5 Mg와 화학비료(1번처리 동일)를, 3번 처리는 벧짚 5 Mg에 완효성비료(“LONGSTAR Pajongsang”) N 45 kg 해당량을 처리하였다. 4번 처리는 바이오차르 2 Mg에 화학비료(1번 처리 동일), 5번 처리는 바이오차르 2 Mg에 완효성비료 N 45 kg 해당량을 처리하였다 (Table 2). 화학비료 처리의 경우 N는 요소, P_2O_5 는 용과린, K_2O 는 염화加里로 각각 사용하였으며, N는 기비 50%, 분얼비 20%, 수비 30% 분시하였고, 인산은 전량 기비, 칼리는 기비 70%, 수비 30% 각각 분시하였다. 완

Table 1. Physico-chemical properties of paddy soil before the experiment in 2012

pH (1:5)	OM (g kg ⁻¹)	T-N (g kg ⁻¹)	T-C (g kg ⁻¹)	Av. P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	Ex. Cations (cmol kg ⁻¹)			Av. SiO ₂ (mg kg ⁻¹)	Soil texture
					K	Ca	Mg		
5.4	22	1.3	12.8	44	0.23	6.7	1.5	68	SiL

Table 2. Description of experimental treatments

Treatments	Amount of application ha ⁻¹
1. NPK	Chemical fertilizers which were the equivalent amount of the standard application for paddy field Chemical fertilizer: N-P ₂ O ₅ -K ₂ O=90-45-57 kg ha ⁻¹
2. RS+NPK	Rice straw 5 Mg ha ⁻¹ +NPK
3. RS+SRF	Rice straw 5 Mg ha ⁻¹ +the equivalent amount of N 45 kg in SRF (Slow-release fertilizer, "LONGSTAR Pajongsang") SRF : N-P ₂ O ₅ -K ₂ O=45-9-9 kg ha ⁻¹
4. BC+NPK	Biochar 2 Mg ha ⁻¹ +NPK
5. BC+SRF	Biochar 2 Mg ha ⁻¹ +SRF

Table 3. Analysis conditions for CH₄ measurement using gas chromatography

Detector	FID
Column	HP-PLOT/Q 0.530 mm Diam. 30 m Length
Carrier gas	N ₂
Flow rate	10 mL min ⁻¹
Temperature	Sampler 50°C Oven 40°C Detector 250°C
Retention time	1.18 min

효성비료의 성분량은 N-P₂O₅-K₂O=30-6-6%이었으며 파종시 모판에 사용하여 1회 시용하였다.

시험에 처리한 유기물인 생볏짚 (rice straw)은 시험년도 전년도에 수확된 생볏짚을 가을(11월)에 콤바인으로 절단하여 토양에 시용 후 경운하였다. 시험에 사용한 바이오차르는 강진군 농협에서 판매하는 제품으로, 왕겨를 소규모 반응기(DCH-400, 1.4 m × 5.2 m × 5 m, L × W × H) 내에서 500~600°C의 온도조건으로 열분해한 부산물이다. 열분해 반응기는 한국 대원 GSI에서 제작하였다. 대상지의 기상자료는 경기도 오산시 외삼미동 관측소 자료이며 자료는 http://203.247.66.10/weather/observation/aws_table_popup.jsp의 주소에서 받았다.

2. 메탄채취 및 분석방법

메탄 채취용 챔버는 폴리카보네이트(polycarbonate)를 이용하여 제작되었으며 가로, 세로, 높이는 각각 60 cm, 60 cm, 120 cm이었으며 (Fig. 1) 처리당 3반복의 챔버내에는 묘수는 3분씩 8주 식재되도록 조절하였다. 메탄시료는 주 2회, 매회 오전 10시 30분부터 11시까지 20 mL 바이알로 자동 채취되도록 하였다(Kim *et al.* 2010). 가스채취방법은 챔버의 윗 뚜껑을 닫자마자 1차로 채취하고 다시 30분경과 후 2차로 채취되도록 하였다. 바이알은 채취할 때 박스 내부에 펌프와 이중 니들이 있으며 샘플 채취시 니들이 자동으로 상하왕복 구동장치에 의해서 아래로 내려와서 바이알의 내부로 삽입되고 펌프가 30초간 작동하여 챔버 내부에 있는 샘플을 바이알 속으

로 유입되게 되며 30초 이후엔 이중니들 한쪽만 빠지게 하여 5초간 대기하면서 바이알속 기압을 대기압과 평형되도록 맞춘 후 니들을 상부의 원래 위치로 복귀하며 샘플채취가 끝나게 된다. 또한 시료 채취시 마다 온도와 눈물로부터 챔버 상단까지의 유효높이를 조사하였다. 채취된 바이알 내 메탄분석은 3개 포트 가스 채취 밸브(3 Port gas sampling valve)가 장착된 GC-FID(7890GC, Agilent)로 분석하였으며, column은 Capillary HP-PLOT/Q 30 m × 0.530 mm 이었고 운반기체(carrier gas)는 N₂로 유속을 분당 10 mL로 조절하였다(Table 3).

3. 메탄 배출량 계산

메탄 배출량(flux, F)은 아래 식(1)에 의하여 계산하였다.

$$F = \rho \times V/A \times \Delta c/\Delta t \times 273/T \text{ 또는} \\ F = \rho \times h \times \Delta c/\Delta t \times 273/T \quad (1)$$

F: 단위시간 당 단위면적에서 배출되는 CH₄의 양(mg CH₄ m⁻² hr⁻¹)

ρ: CH₄의 밀도를 고려한 변환계수(mg m⁻³)

A: 가스포집장치의 바닥면적(m²)

V: 가스포집장치내 공기의 체적(m³)

h: 가스포집장치내 유효높이(눈물로부터의 높이, m)

Δc/Δt: 가스포집장치내 CH₄ 농도의 평균증가속도(ppmv hr⁻¹)

T: 가스포집장치내 평균기온(K), pCH₄=0.714 (T=273 K)

Table 4. Particle size distribution of biochar and its raw material, rice husk

Tested materials	Percentage of particle size distribution (%)						Water (%)	Bulk density (Mg m ⁻³)
	>2 mm	1~2 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	0.25~0.11 mm	<0.11 mm		
Rice husk biochar	3	19	33	28	11	5	4.6	0.18
Rice husk	85	11	3	1	0	0	5.1	0.13

Table 5. Chemical properties of applied materials

Tested materials	T-N (%)	T-C (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na ₂ O (%)
Applied materials							
Rice straw	0.55	50.31	0.19	1.50	0.45	0.16	0.07
Rice husk biochar	0.57	47.02	0.18	1.09	0.30	0.22	0.29
Raw material of biochar							
Rice husk	0.35	40.54	0.09	0.51	0.14	0.05	0.02

4. 토양과 투입물질 분석 및 기타 조사방법

토양분석은 토양 및 식물체 분석법 (NIAST 2000)에 준하였다. 기상자료는 경기도농업기술원내 예찰답에 있는 자동기상관측기 (AWS)의 기상자료를 이용하였다. 토양 산화환원전위 (Eh)는 백금전극을 토심 15 cm 깊이에 묻고 Eh 미터 (Ecoscan, Eutech)를 이용하여 측정하였다. 벼의 생육 및 수량조사는 농업과학기술 연구조사분석기준 (RDA 2012)에 준하여 조사하였다. 통계분석은 SAS 9.2 통계패키지를 이용하여 유의수준은 5%의 확률로 하여 Duncan의 다중비교법 (Duncan's multiple range test, DMRT)으로 검정하였다.

결과 및 토의

1. 시험재료의 이화학적 특성 및 시험기간의 기후

시험재료로 사용된 바이오차르와 바이오차르의 원료인 왕겨의 물리적 특성중 하나인 입경분포를 조사한 결과 바이오차르는 1~2 mm 19%, 1~0.5 mm 33%, 0.5~0.25 mm 28% 등 입경분포가 골고루 퍼져 있었으며, 바이오차르의 원료인 왕겨는 입경분포 비율이 >2 mm 이상이 85%로 대부분이었다. 고른 입경분포 비율로 인하여 바이오차르의 용적밀도가 왕겨에 비하여 높았다 (Table 4). 시험에 투입물질로 사용된 바이오차르와 볏짚의 화학성을 분석한 결과는 Table 5와 같다. 바이오차르의 총 질소 함량은 0.57%, 총 탄소 함량은 47.02%로 원료인 왕겨에 비해 높았다. 반면 볏짚 처리구에 들어갈 볏짚의 총 탄소와 질소의 함량은 왕겨 바이오차르와 비슷한 수준이었다.

전년 (2013년)도 11월 추경을 실시하고 평년과 2013, 2014년 동계기간의 평균온도의 변화 (Fig. 1)는 2013년도에는 -2.5°C로 저온으로 경과된 반면 2014년도는 2.4°C로써 전년도에 비하여 4.9°C가 더 높음으로써 상대적으로 높은 기온으로 동계기간을 경과하였는데, 이로써 년도별 동계기간의 평균 온도가 양해 년도에 크게 차이남을 알 수 있었으며, 온도의 차이는 토양속에 매몰되어 있는 볏짚의 분해정도에 영향을 줄수 있음을 예측할 수 있었다. 반면 벼 재배기간 동안의 평균온도는 2013년은 24.1°C, 2014년은 23.3°C로 큰 차이가 없었다 (Fig. 2). 벼 재배기간동안의 총 강우량은 2013년에는 797.1 mm에 비하여 2014년에는 599.0 mm로 적었으며, 2013년, 2014년 모두 평년의 1,140.2 mm에 비해서는 특히 낮은 강우량을 보였다 (Fig. 3)

2. 메탄 일일 배출량

주요 생육기간중 시험처리별 시간당 메탄 배출량의 변화 (Fig. 4)는 NPK 처리와 RS+NPK 처리에서 전생육기간 높고, BC+NPK, BC+SRF 처리에서는 낮게 경과하여 바이오차르의 시용이 메탄발생을 감소시키는 경향을 확인할 수 있었다. 또한 RS+NPK와 RS+SRF를 비교해보면 NPK 처리보다 완효성비료를 처리한 RS+SRF에서 메탄발생량이 감소함을 알 수 있었다. 시험처리별 일일 메탄 배출량을 비교한 결과는 Fig. 5와 같이 NPK 처리만 했을 경우 일일 메탄 배출량 (kg ha⁻¹ day⁻¹)은 1.37이었던 반면, RS+NPK 처리구에는 1.58로 15%가 더 많이 발생되었다. Ko *et al.* (2011)은 논토양 메탄발생량이 토양 유기물 함량의 순서와 일치하였으며, 논 토양 온실가스 배출량과 토양 유기물 함량 사이에는 고도로 유의한

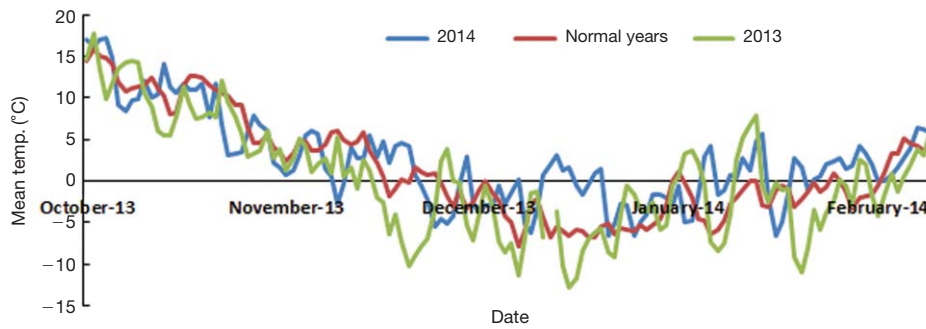


Fig. 1. Changes in temperatures of the two winter seasons from October to February of the following year. Green line is the temperature change from Oct 2012 to Feb 2013 (Average -2.5°C) and blue line is the temperature change from Oct 2013 to Feb 2014 (Average 2.4°C). Red line is the change in average temperature during the same period from 2003~2012.

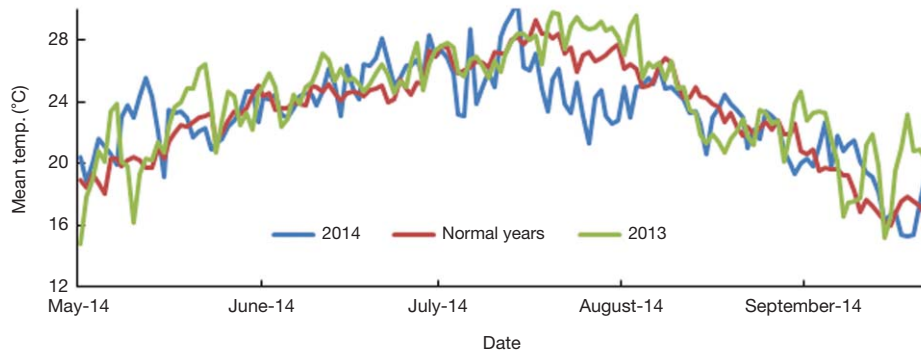


Fig. 2. Changes in temperatures of the two growing seasons from May to September. Green line is the temperature change in 2013 (Average 24.1°C) and blue line is the temperature change in 2014 (Average 23.3°C). Red line is the change in average temperature during the same period from 2003~2012.

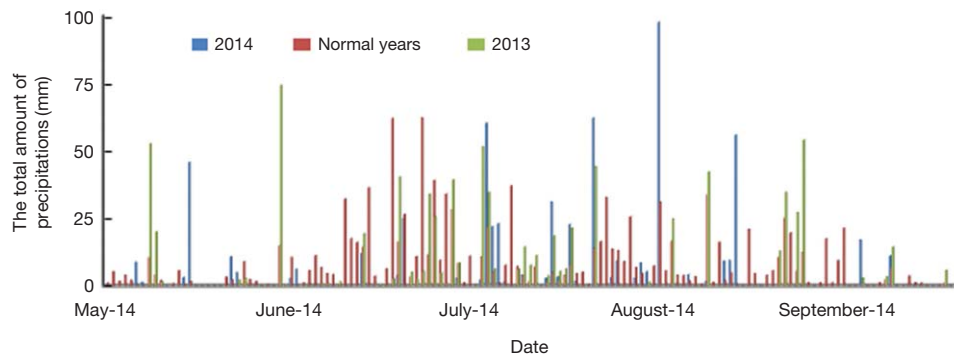


Fig. 3. Comparison of precipitations during the growing seasons in 2013 and 2014. Green bars are the amount of precipitation in 2013 (Average 797.1 mm) and blue bars are the amount of precipitation in 2014 (Average 599.0 mm). Red bars are the amount of average precipitation during the same period from 2003~2012.

양의 상관 관계가 있다고 하였는데 본 시험에서도 유기물 함량이 높은 볏짚 처리구에서 메탄 발생량이 높게 나타난 것을 알 수 있다. Yagi *et al.* (1990)은 유기물원으로 볏짚 사용시 NPK구에 비하여 1.8~3.5배의 메탄이

더 배출 되었다고 하였으며, Ju *et al.* (2013)은 벼 재배 논에서 ha당 볏짚 0, 3, 5, 7 Mg을 사용하여 일일 메탄배출량 ($\text{kg ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$)을 측정 한 결과 무처리에서 1.99 kg 이었고 볏짚 5 Mg에서는 2.81 kg 으로 많이 증가하였으

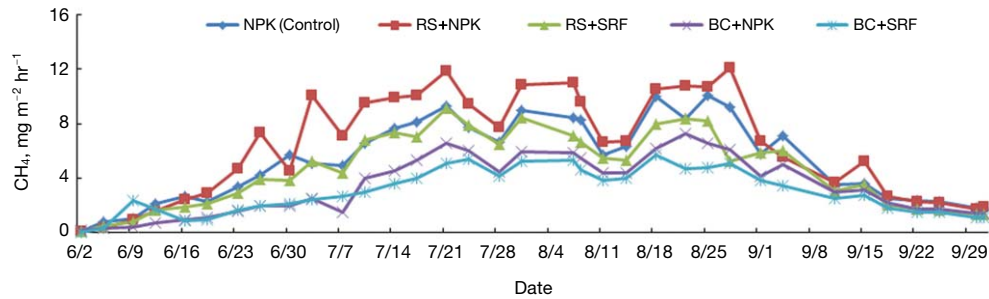


Fig. 4. Changes in CH₄ emission rates from the paddy soils by NPK, RS+NPK, RS+SRF, BC+NPK, and BC+SRF treatments. Values represent mean of 3 replicated samples.

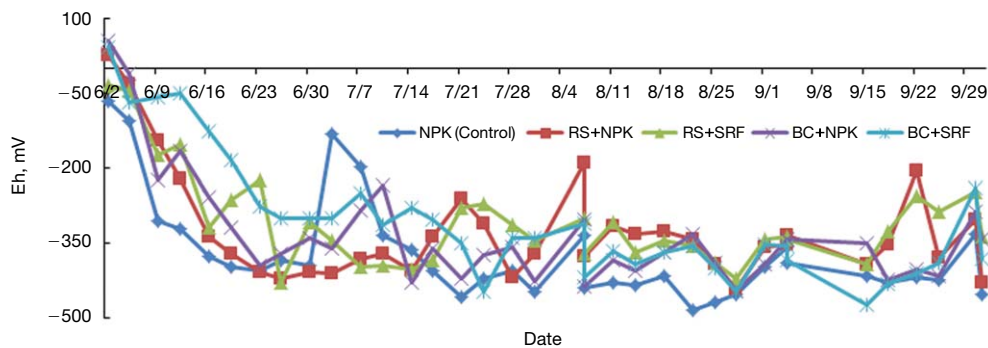


Fig. 5. Changes in soil Eh values in the paddy fields by NPK, RS+NPK, RS+SRF, BC+NPK, and BC+SRF treatments. Values represent mean of 3 replicated samples.

나, 본시험에서는 Fig. 5에서와 같이 벧짚 5 Mg 처리시 무처리 대비 증가폭이 상대적으로 적었다. 이는 11월에 벧짚을 시용하고 경운한 후 경과하는 동계기간의 평균 온도가 2013년~2014년이 높았으므로 시용한 벧짚이 많이 분해되었기 때문으로 사료된다. 본 연구에서 바이오차르 투입에 따른 메탄발생의 저감은 바이오차르의 다공성 성질로 인해 토양 내의 통기성이 확보되어 혐기성 메탄발생 미생물의 활성이 저하되었기 때문으로 추측된다. 이와 같은 관찰은 Yoo and Kang (2012)에서도 유사하게 보고되었다.

RS+NPK와 RS+SRF를 비교해 보면 RS+NPK 처리보다 완효성비료를 처리한 RS+SRF에서 메탄발생량이 감소함을 알 수 있었는데, 이는 Jung *et al.* (2013)의 연구결과와 일치하였다. 이들은 완효성 비료를 처리한 경우 메탄의 발생이 약 50%가 절감된다고 보고하였다. 한편, BC+NPK, BC+SRF 처리에서는 일일 메탄발생량이 특히 적었는데, BC+NPK 처리시 0.85 kg, BC+SRF 처리시 0.75 kg로써 NPK와 비교하면 각각 62%, 55%로 메탄발생량이 크게 줄었다. 토양 Eh의 변화는 메탄발생과의 일정한 경향이 보이지 않았지만 (Fig. 5), 이는 본 실험의

조건이 메탄의 발생이 충분히 일어날 수 있는 조건인 Eh -250 ~ -300 mV 이하로 유지되었기 때문인 것으로 사료된다.

3. 생육 및 수량

초장은 이양후 30, 60, 140일후, 분얼수는 30, 45, 60, 75일에 조사한 결과 (Table 6) 초장은 BC+NPK 처리구에서 가장 크고, 분얼수 또한 많았으며 생육기간이 길어질수록 바이오차르가 포함된 BC+NPK, BC+SRF 두 처리에서 다른 처리구에 비하여 초장과 분얼수가 많아지는 경향이 관찰되었다. 건물중 (Mg ha⁻¹)의 변화에서도 이양후 60일, 140일로 갈수록 초장과 분얼수가 많았던 BC+NPK, BC+SRF 처리에서 무거워서 이양후 140일에는 각각 13.07, 13.06 Mg으로 대조구 NPK 처리의 12.22 Mg보다 많아지는 경향을 나타내었다.

수확기 벼의 수량구성요소와 벼의 수량은 Table 7과 같다. BC+NPK, BC+SRF 처리시 바이오차르를 제외하면 NPK와 SRF는 쌀수량에는 동일한 효과를 제공한 것으로 판단되었다. Won *et al.* (2014)은 10 a당 NPK 표준시

Table 6. Changes in the plant growth status after transplanting of paddy rice

Treatments	Plant height (cm)			Tiller (no. hill ⁻¹)			
	30 DAT*	60 DAT	140 DAT	30 DAT	45 DAT	60 DAT	75 DAT
1. NPK	35.4	64.4	76.9	23.2	23.0	20.6	20.4
2. RS+NPK	37.1	69.8	78.9	31.0	29.3	22.9	22.0
3. RS+SRF	33.5	66.9	78.2	22.5	23.6	20.8	19.9
4. BC+NPK	36.6	70.2	82.5	32.4	30.3	26.3	26.3
5. BC+SRF	36.3	69.7	82.1	26.9	27.5	24.0	23.8

*DAT stands for day after transplanting.

**Values represent mean of 3 replicated samples.

Table 7. Yield components and grain yields

Treatments	Panicles (no. hill ⁻¹)	Spikelet (no. panicle ⁻¹)	Ripened ratio (%)	1,000 grain weight (g)	Yield (Mg ha ⁻¹)
1. NPK	17.4	75.3	96.4	21.4	5.09 b*
2. RS+NPK	17.8	75.7	97.3	21.4	5.32 a
3. RS+SRF	17.6	75.5	97.2	21.4	5.24 ab
4. BC+NPK	18.3	74.5	97.1	21.4	5.44 a
5. BC+SRF	18.2	74.5	97.3	21.4	5.45 a

*Numbers with different letters stand for significant difference at 5% probability level.

**Values represent mean of 3 replicated samples.

비량과 동일한 SRF는 육묘상자당 500 g이라고 하였는데 본 시험에서도 육묘상자당 500 g이 사용되었으므로 수량은 비슷하게 확인되었다. 수량에 비슷한 효과를 나타내는 NPK와 SRF에 바이오차르가 더해진 BC+NPK, BC+SRF 처리시 다른 처리에 비하여 수수가 각각 18.3, 18.2 개로 다른 처리구의 17.4~17.8개에 비하여 많아서 ha 당 쌀수량은 각각 5.44, 5.45 Mg로 대조구인 NPK 처리보다 쌀수량은 두처리에서 모두 7%가 증수되었다.

사 사

본 논문은 농촌진흥청 어젠다사업 (과제번호: PJ00925 3012014)의 지원에 의해 이루어진 것임.

REFERENCES

- Banger K, Tian H and Lu C. 2012. Do nitrogen fertilizers stimulate or inhibit methane emissions from rice fields? *Global Change Biol.* 18: 3259-3267.
- Hanson, RS and Hanson TE. 1996. Methanotrophic bacteria. *Microbiol Rev.* 60:439-471.
- Houghton JT, Jenkins GJ and Ephraums JJ. 1990. *Climate change: the IPCC scientific assessment.* Cambridge University Press, New York.
- Ju O, Won TJ, Cho KR, Choi BR, Seo JS, Park IT and Kim GY. 2013. New estimates of CH₄ emission scaling factors by amount of rice straw applied from Korea paddy fields. *Korean J. Environ. Agric.* 32:179-184.
- Jung SC, Lee TG, Jeong JW, Huh JH and Kim YS. 2013. Carbon footprint of seeding elution control type coated fertilizer using LCA and its comparison with customized fertilizer. *Korean J. Lfe. Cycle. Assess.* 14:51-58.
- Karhu K, Mattilab T, Bergstroma I and Regianc K. 2011. Biochar addition to agricultural soil increased CH₄ uptake and water holding capacity - Results from a short-term pilot field study. *Agric. Ecosyst. Environ.* 140:309-313.
- Kim GY, Jim PJ, Roh KA, Jeong HC and So KH. 2010. Effect of intermittent drainage on suppressing methane emission in rice paddy soil. *Korean. Soc. Soil. Sci. Fert.* 216.
- Ko JY, Lee JS, Kim MT, Kang HW, Kang UG, Lee DC, Shin KY and Lee KB. 2002. Effects of cultural practices on methane emission in tillage and no-tillage practice from rice paddy fields. *Korean J. Soil. Sci. Fert.* 35:216-222.
- Ko JY, Lee JS, Woo KS, Song SB, Kang JR, Seo MC, Kwak DY, Oh BG and Nam MH. 2011. Effects of soil organic matter contents, paddy types and agricultural climatic zone on CH₄ emissions from rice paddy field. *Korean J. Soil. Sci. Fert.* 44:887-894.
- Laird DA, Fleming P, Davis DD and Horton R. 2010. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil. *Geoderma* 158:443-449.
- Le Mer J and Roger P. 2001. Production, oxidation, emission

- and consumption of methane by soils: A review. *Eur J. Soil Biol.* 37:25-50.
- Lehmann J, Gaunt J and Rond M. 2006. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems - a review. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Chang.* 11:403-427.
- NIAST. 2010. Standard management for fertilization. 16-17.
- Novak JM, Busscher WJ, Laird DL, Ahmedna M, Watt DW and Niandou MAS. 2009. Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil. *Soil Sci.* 174: 105-112.
- RDA. 2010. Calculation of greenhouse gas emission in agricultural sector for 2020 and its response measures for national allocation. Final report.
- Rondon MA, Ramirez JA and Lehmann J. 2005. Greenhouse gas emissions decrease with charcoal additions to tropical soils: In: *Proceedings of the 3rd USDA Symposium on Greenhouse Gases and Carbon Sequestration*. Baltimore, USA, March 21-24, 2005. pp. 208.
- SAS Institute. 2008. *SAS User's Guide*. SAS Institute Inc. Cary, NC.
- Shin YK, Lee YS, Ahn JW, Koh MH and Eom KC. 2003. Seasonal change of rice-mediated emission from a rice paddy under different water management and organic amendments. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 36:41-49.
- Won TJ. 2014. Application effects of the controlled slow release fertilizer applied to seedling tray in rice. *Chungbuk National University*.
- Yagi K, Minami K and Ogawa Y. 1990. Effects of water percolation on methane emission from some Japanese paddy fields. *Soil Sci. Plant. Nutr.* 36:599-610.
- Yang CH, Jeong JH, Kim TK, Kim S, Baek NH, Choi WY, Kim YD, Jung WK and Kim SJ. 2010. Effect of long term annual dressing of organic matter on physico-chemical properties and nitrogen uptake in the paddy soil of fluvio-marine deposit. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43:981-986.
- Yoo G and Kang H. 2012. Effects of biochar addition on greenhouse gas emissions and microbial responses in a short-term laboratory experiment. *J. Environ. Qual.* 41:1193-1202.
- Yu L, Tang J, Zhang R, Wu Q and Gong M. 2013. Effects of biochar application on soil methane emission at different soil moisture level. *Biol. Fertil. Soils* 49:119-128.

Received: 10 November 2014

Revised: 7 December 2014

Revision accepted: 8 December 2014