

〈Original article〉

벼논에서 양분관리별 탄소의 흡수·배출에 대한 탄소수지 평가

김건엽* · 이종식 · 이선일 · 정현철 · 최은정 · 나운성

농촌진흥청 국립농업과학원 기후변화생태과

Evaluation of Carbon Balance for Carbon Sink/Emission with Different Treatments in Paddy Field

Gun-Yeob Kim*, Jong-Sik Lee, Sun-Il Lee, Hyun-Cheol Jeong, Eun-Jung Choi and Un-sung Na

National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju 55365, Republic of Korea

Abstract - Importance of climate change and its impact on agriculture and environment has increased with the rise in the levels of Green House Gases (GHGs) in the atmosphere. To slow down the speed of climate change, numerous efforts have been applied in industrial sectors to reduce GHGs emission and to enhance carbon storage. In the agricultural sector, several types of research have been performed with emphasis on GHGs emission reduction; however, only a few work has been done in understanding the role of carbon sink on reduction in GHGs emission. In this study, we investigated ecosystem carbon balance and soil carbon storage in an agricultural paddy field. The results obtained were as follows: 1) Evaluation of soil C sequestration in paddy field was average 3.88 Mg CO₂ ha⁻¹ following NPK + rice straw compost treatment, average 3.22 Mg C ha⁻¹ following NPK + hairy vetch treatment, and average 1.97 Mg CO₂ ha⁻¹ following NPK treatment; and 2) Net ecosystem production (NEP) during the paddy growing season was average 14.01 Mg C ha⁻¹ following NPK + hairy vetch treatment, average 12.60 Mg CO₂ ha⁻¹ following NPK + rice straw compost treatment, and average 11.31 Mg CO₂ ha⁻¹ following NPK treatment. Therefore, it is proposed that organic matter treatment can lead to an increase in soil organic carbon accumulation and carbon sock of crop ecosystem in fields compared to chemical fertilizers.

Keywords : carbon balance, rice paddy field, GHGs emission

서 론

대기 중 이산화탄소(CO₂) 농도는 토지이용 방법과 화석연료 사용 빈도에 따라서 달라진다. 최근 화석연료의 과다사용과 도시지역 확대 및 산림과 농경지의 잠식에 수반되는 생태계의 식생피복 변화로 대기 중 CO₂는 계속 증가하고 있다(Bruce *et al.* 1998; IPCC 2007). 최근 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)의 연구 결과

에 의하면 지난 1990년대 이후로 주요 온실가스인 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O) 그리고 염화불화탄소(CFCs)가 전체 온실가스의 97%를 차지하고 있다고 한다(IPCC 1996). 이 중에 CO₂는 1990년을 기준으로 2006년까지 증가된 온실가스의 80% 이상을 차지하고 있는 것으로 나타났다(Hutchinson *et al.* 2007). CFCs와 같은 온실가스는 줄어들고 있는 반면에 CO₂는 증가 추세에 있기 때문에 이를 줄이기 위한 노력이 절실하게 요구된다(Desjardins *et al.* 2005).

전 지구적 탄소순환의 메커니즘과 양적 순환관계 파악과 예측을 위해서는 토양권 탄소의 동태 파악이 매우 중요한

* Corresponding author: Gun-Yeob Kim, Tel. 063-238-2493, Fax. 063-238-3823, E-mail. gykim1024@korea.kr

Table 1. Chemical properties of soil before experiment

Year	Treatments	pH (1:5)	EC (dS m ⁻¹)	OM (g kg ⁻¹)	Av.P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	TOC (g kg ⁻¹)	T-N (mg kg ⁻¹)	Ex. Cation (cmol _c kg ⁻¹)		
								K	Ca	Mg
2014		6.2	0.57	7.8	147	4.5	60.8	0.64	5.08	0.56
2015	NPK	6.3	0.51	9.8	117	4.3	61.4	0.27	4.37	1.82
	NPK + Hairy vetch	6.7	0.55	12.8	132	5.7	75.8	0.32	5.24	2.04
	NPK + Rice straw compost	7.1	0.57	11.5	121	4.9	73.5	0.37	4.97	2.01
2016	NPK	6.9	0.73	10.7	146.6	8.0	67.9	0.42	5.43	2.31
	NPK + Hairy vetch	7.0	0.61	13.8	175.6	9.6	80.4	0.51	7.18	3.94
	NPK + Rice straw compost	6.9	0.64	12.8	139.4	10.7	79.5	0.49	6.87	3.83

역할을 하며 (Raich and Schlesinger 1992; Bond-Lamberty *et al.* 2004), 이와 더불어 산림, 초지, 습지, 농경지와 같은 다양한 육상생태계의 식생과 대기 간에 교환되는 CO₂ 플럭스를 정량화하는 연구가 활발히 진행되고 있다 (Baldocchi *et al.* 2001; Baldocchi 2008). 육상생태계는 크게 토양권과 식생권으로 구분할 수 있으며 (Kim and Kim 1998; Lee 2012), 연간 육상생태계로 유입되는 탄소의 양은 약 2±1 Pg Cy r⁻¹으로 추정되고 있다 (IGBP 1998). 이중 토양권은 식생의 약 3배, 대기의 약 2배에 달하는 막대한 양의 탄소를 축적하고 있으며 (Waring and Running 1995), 토양권으로부터 연간 75 Pg의 탄소가 토양호흡의 형태로 대기 중으로 배출된다. 이와 같이 토양은 온실가스의 배출원이지만 한편으로는 생물권 중 육상 생태계 내에 있는 탄소 양의 2/3 이상을 저장하는 탄소 저장고 역할 (Guanhui *et al.* 1999)을 하기 때문에 전 지구적 탄소순환에서 매우 중요한 역할을 하고 있다 (Bond-Lamberty *et al.* 2004). 식생권에서 CO₂는 작물의 광합성작용에 의해서 유기탄소 형태로 바뀌어 작물의 조직이나 기관을 구성하고 있다 (Desjardins *et al.* 2005; Thomson *et al.* 2006). 이러한 유기탄소는 작물생육기간 중에는 살아있는 작물의 형태로, 그리고 수확을 하거나 수명을 다하면 소각하거나 또는 잔사로서 농경지에 존재하게 된다. 농경지에서 탄소 고정량은 작물별로 광합성능력, 토양관리나 재배 방법의 차이에 의해서 달라진다 (Cambell *et al.* 2005; Gregorich *et al.* 2005). 농업생태계에 있어 토양과 작물은 토양호흡과 작물의 생장을 통해 상당량의 탄소를 저장 또는 배출하고 있다 (Schlesinger 2000). 그리고 작물 균락의 CO₂ 플럭스는 크게 식생의 광합성과 토양호흡에 의해 결정된다 (IACGEC 1996). 따라서 농업에서 탄소 저장과 배출은 농경지 내 탄소수지 (Follett *et al.* 2001), 토양 유기탄소 축적과 작물의 전과정 목록 (Life Cycle Inventory; LCI) 작성에서 수확지수 이용 등으로 농업활동으로부터 농경지 탄소 평가를 위한 기초 자료로 이용할 수 있다.

본 연구에서는 토양 유기탄소 축적량 변화와 작물의 생태

계 탄소 수지를 산정하여 농업의 탄소 관리에 필요한 기초 자료를 제공하는 것을 목적으로 하였다.

재료 및 방법

1. 처리 및 시료 분석방법

본시험은 전라북도 완주군 이서면에 위치한 국립농업과학원의 시험포장(위도: 35°82'41.5"N, 경도: 127°04'36.0"E)에서 2014~2016년(3년) 동안 수행하였다. 시험 토양은 pH는 6.2~7.1, 유기물함량은 7.8~13.8 g kg⁻¹로서 특성은 Table 1과 같고 농촌진흥청 토양화학분석법 (NAAS 2010)에 준하였다. 대상작물은 신동진 벼를 이양하였고, 비료 사용량은 농촌진흥청 작물별 시비처방기준 (RDA 2006)의 표준시비량을 기준으로 하였으며, 벼 재배에서 NPK 처리는 N-P₂O₅-K₂O를 110-90-70 kg ha⁻¹으로 요소를 2회 분시, 인산은 용성인비로 전량 기비, 칼리는 염화칼리를 1회 분시 하였다. 비료 및 유기물처리에는 NPK, NPK (질소 성분량 50%) + 헤어리베치 생초 (질소 성분량 50%), NPK (질소 성분량 50%) + 볏짚퇴비 (질소 성분량 50%) 등 3처리 3반복으로 각 처리당 질소성분량 100%에 맞추었다. 유기물 건물투입량은 헤어리베치 1,719 kg ha⁻¹, 볏짚퇴비 9,483 kg ha⁻¹이었다. 유기물의 탄소함량은 헤어리베치가 439 g kg⁻¹, 볏짚퇴비는 405 g kg⁻¹였고 질소함량은 헤어리베치가 32 g kg⁻¹, 볏짚퇴비는 5.8 g kg⁻¹이었다. 그러므로 유기물 처리구에서 단위 면적당 질소투입량으로 환산하면 헤어리베치와 볏짚퇴비구 모두 55 kg ha⁻¹이며 탄소투입량은 헤어리베치가 754.6 kg ha⁻¹, 볏짚퇴비는 3,840.6 kg ha⁻¹이었다. 볏짚퇴비 제조 규격은 쌀겨나 깻묵 10%와 수분 50%를 첨가하고, 초기 발효촉진을 위해 당밀 1% (볏짚 1 톤당 당밀 10 kg) 혼합하였고 볏짚무게 대비 요소 1.2%를 추가하였다.

토양화학성은 토양시료를 채취하여 풍건 후 2 mm체를 통과시켜 농촌진흥청 토양화학분석법 (NAAS 2010)에 준하여

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. 유효인산은 Lancaster법으로 720 nm 파장에서 비색계 (AU/CARY 300, Varian, Australia)로 분석하였으며, 치환성 양이온은 1 M NH₄OAC (pH 7.0)용액으로 침출하여 유도결합플라즈마발출분광기 (Optima 7300DV, Perkin Elmer)로 분석하였다. 총 탄소와 유기물은 TOC-meter (Vario TOC cube, Elementar, Germany)로 유기물은 토양시료에 2 M HCl을 기포가 발생하지 않을 때까지 침출 건조시켜 무기탄소 성분을 제거 후 TOC 분석기로 분석하였으며 (Wang *et al.* 2012), 총 질소는 CN analyzer (Vario Max CN, Elementar, Germany)로 분석하였다. 특히 토양 유기탄소를 포함한 총 탄소분석은 벼의 생육단계별로 분석하였다.

2. 시료채취 및 온실가스 분석방법

시험포장에서 CO₂와 CH₄ 플럭스를 조사하기 위해 챔버법 (Sebacher *et al.* 1980; Yagi *et al.* 1990; Shin *et al.* 1995)을 이용하였다. 설치된 챔버는 밑면적이 0.36 m² (0.6×0.6 m)이고 높이가 1 m인 투명한 polyacrylic plastic의 소재로 제작하였으며 (Fig. 1), 가스포집 챔버는 벼 재배기간 동안 논토양 위에 고정하여 설치하였고 포집하지 않을 때는 챔버 덮개를 열어두었다. 챔버 재원과 가스포집 형태는 기존에 검증 받았던 방법 (Sebacher *et al.* 1980; Yagi *et al.* 1990; Shin *et al.*

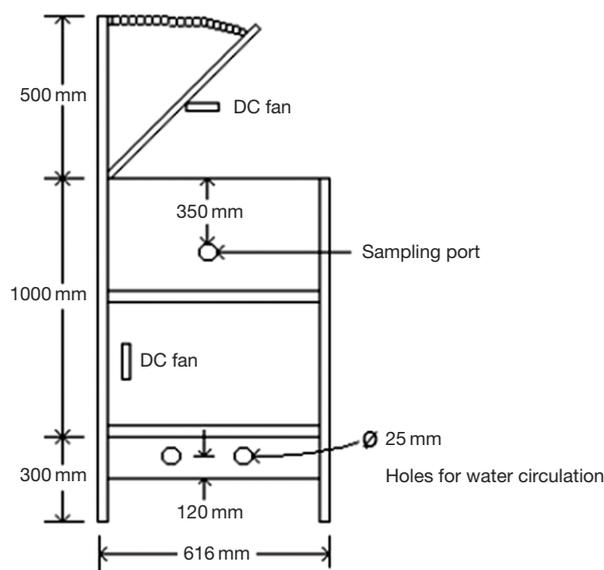


Fig. 1. Schematic cross section of gas collecting chamber for measurement of methane emission rates in paddy rice field.

Table 2. Gas chromatographic analysis conditions for CH₄ and CO₂ measurement

Detector		FID
Column	Packing material	Porapack N (80/100)
	Materials	Stainless steel
	O.D. × length	1/8" × 2 m
Carrier gas		N ₂
Flow rate		30 mL min ⁻¹
Temperature	Column	70°C
	Injector	80°C
	Detector	200°C
Retention time		0.63 min
Concentration of calibration gas		9.6 and 100 ppm CH ₄ in N ₂
Loop		2 mL

1995)에 의해 제작하였으며, CO₂와 CH₄ 포집은 가스 채취 시작시점에 가스 포집 즉시 챔버 위쪽 덮개를 덮고, 그리고 30분 후 가스를 포집하여 30분 전 포집한 농도와 30분 후 포집한 농도차를 이용하여 배출량을 측정하였다 (Sebacher *et al.* 1980; Yagi *et al.* 1990; Shin *et al.* 1995). 가스시료 채취는 Yagi *et al.* (1991)의 방법에 의하여 24시간 배출되는 온실가스 농도를 평균한 값의 시간 범위가 하루에 두 번인 오전 10:00~13:00시와 오후 16:00~19:00시로 나타나 오전과 오후 시간 중에 하나의 시간범위를 선택하여 가스를 채취하므로 본 시험에서는 오전 10:00~13:00시 사이에 60 mL 주사기로 1주일에 2회 (IPCC 1996) 채취하여 분석하였다. 채취한 공기 시료의 CO₂와 CH₄ 기체농도는 6 port gas sampling valve가 장착된 GC-FID (Varian 3800)로 분석하였다. CO₂와 CH₄ 분석조건은 Table 2와 같다.

CO₂ (Rolston 1986; Lou *et al.* 2004)와 CH₄ 배출량 플럭스 (Minami and Yagi 1988)는 다음 식에 따라서 계산 (F: mg m⁻² hr⁻¹)하였다.

$$F = \rho \times (V/A) \times (\Delta c/\Delta t) \times (273/T) \quad (1)$$

ρ 는 가스밀도 (CO₂ 1.977 mg m⁻³, CH₄ 0.714 mg m⁻³),

A는 chamber 바닥면적 (m²),

V는 chamber 내 공기체적 (m³),

$\Delta c/\Delta t$ 는 chamber 내 가스농도의 평균 증가속도 (10⁻⁶ m³ m⁻³ hr⁻¹),

T는 chamber 내 평균기온 (K).

3. 벼 재배지의 토양 유기탄소 및 생태계 순 생산량 산정

벼 재배지에서 토양 유기탄소와 생태계 순 생산량을 산정하기 위하여 벼 생육단계별로 토양과 식물체 시료를 채취하

여 분석하였으며, 벼 재배지의 탄소수지 평가는 아래 식에 따라서 계산하였다.

1) 토양 유기탄소 축적량 변화(IPCC 2006)

$$(SOC) = \frac{SOC_0 - SOC(o-t)}{T} \times A \quad (2)$$

SOC₀: 마지막 해의 토양유기탄소 축적량

SOC(o-t): 첫해의 유기탄소 축적량

T: 인벤토리 기간의 연수

A: 재배면적

2) 작물생태계 탄소 수지

육상 생태계에서 순 일차생산량(Net Primary Production; NPP)은 벼가 CO₂를 흡수하여 광합성을 통해 생산한 총 일차생산량(Net Primary Production; NPP)과 타가 호흡량(Heterotrophic Respiration; HR)의 차이로 나타낼 수 있다.

$$NEP = NPP - HR \quad (3)$$

NEP(Net Ecosystem Production): 생태계 순 생산량

NPP(Net Primary Production): 순 일차생산량

HR(Heterotrophic Respiration): 타가호흡

토양 유기탄소 축적량은 수확 전후의 토양 유기 탄소량 차이로 계산하였고(IPCC 2006), 벼 작물의 생태계 순 생산량은 NEP에서 CH₄(배출 유래 탄소량)를 감하여 계산하였다(Melillo *et al.* 1995).

결과 및 고찰

1. 토양 유기탄소 축적

농업생태계에서 토양과 작물은 토양호흡과 작물의 생장을 통해 상당량의 탄소를 저장 또는 배출하지만(Schlesinger 2000), 토양에서도 CO₂가 연간 1.5~3.0 Gt이 축적된다

(IPCC 1996). 따라서 작물 생산량과 토양 호흡량 그리고 양분의 시비량에 따른 탄소 수지의 계절별 일변화의 정확한 측정은 경작지에서 대기로 배출되는 CO₂ 수지를 분석하는데 있어서 매우 중요하다(Suh *et al.* 2006).

연도별 벼 이앙 전 토양 유기탄소함량은 2014년에 ha당 9.56 Mg에서 2015년 비료 및 유기물 처리에 따라 10.9~12.73 Mg, 2016년에는 12.02~17.38 Mg으로 해가 거듭될수록 토양 유기탄소량이 증가하였다(Table 3).

토양 유기탄소함량을 산정하기 위하여 벼 생육단계별로 토양 중 유기탄소율을 분석하였다(Table 4), 토양 유기 탄소 함량(Table 5)은 토양의 가비중(1.3)에 토양면적에 대한 무게(토양면적×토양깊이 15 cm)와 토양 중 유기탄소율 곱하여 산정하였다. 수확 후 토양 유기탄소함량은 재배 연도가 바뀔수록 증가하였고 유기물 생초를 이용한 헤어리베치 처리구가 화학비료나 볏짚퇴비 처리에 비해 높았다. Table 6은 연도별 벼 재배 토양탄소 수지를 나타낸 것이다. 토양탄소 수지는 수확 후 토양 유기탄소량에서 시험 전 토양 유기탄소량을 감하면 토양 유기탄소 축적량이 계산된다. 토양 유기탄소 축적량은 NPK + 헤어리베치 > NPK + 볏짚퇴비 > NPK 처리 순으로 나타났다. 그러나 토양 탄소수지는 토양 유기탄소 축적량 변화(IPCC 2006) 식을 이용하기 때문에 마지막 해의 토양유기탄소 축적량에서 첫해의 유기탄소

Table 3. Amount of soil organic carbon before experiment during rice cultivation period (2014–2016)

Year	Treatments	Soil organic carbon before experiment (Mg C ha ⁻¹)
2014		9.56
2015	NPK	10.90
	NPK + Hairy vetch	12.18
	NPK + Rice straw compost	12.73
2016	NPK	12.02
	NPK + Hairy vetch	16.24
	NPK + Rice straw compost	17.38

Table 4. Soil organic carbon content for five stages during rice cultivation period (2014–2016)

Year	Treatment	Rooting (%)	Tillering (%)	Internode elongation (%)	Ripening (%)	After harvest (%)
2014	NPK	0.45	0.49	0.52	0.58	0.56
	NPK + Hairy vetch	0.43	0.47	0.58	0.64	0.65
	NPK + Rice straw compost	0.46	0.48	0.64	0.62	0.62
2015	NPK	0.52	0.51	0.52	0.56	0.62
	NPK + Hairy vetch	0.58	0.57	0.64	0.63	0.83
	NPK + Rice straw compost	0.64	0.61	0.97	0.64	0.89
2016	NPK	0.66	0.66	0.69	0.72	0.78
	NPK + Hairy vetch	0.77	0.65	0.78	0.81	1.16
	NPK + Rice straw compost	0.80	0.72	0.71	0.77	1.22

Table 5. Soil organic carbon content for five stages during rice cultivation period (2014–2016)

Year	Treatment	Rooting (Mg C ha ⁻¹)	Tillering ₁ (Mg C ha ⁻¹)	Elongation (Mg C ha ⁻¹)	Ripening ₁ (Mg C ha ⁻¹)	After harvest (Mg C ha ⁻¹)
2014	NPK	8.78	9.56	10.14	11.31	10.90
	NPK + Hairy vetch	8.39	9.17	11.31	12.48	12.73
	NPK + Rice straw compost	8.97	9.36	12.48	12.04	12.18
2015	NPK	10.14	9.95	10.11	10.98	12.02
	NPK + Hairy vetch	12.48	11.90	18.94	12.45	17.38
	NPK + Rice straw compost	11.31	11.12	12.47	12.23	16.24
2016	NPK	12.94	12.77	13.41	14.13	15.33
	NPK + Hairy vetch	14.93	12.63	15.14	15.87	22.63
	NPK + Rice straw compost	15.65	14.09	13.79	15.05	23.88

Table 6. Soil organic carbon budget for different fertilization conditions during rice cultivation period (2014–2016)

Year	Treatments	Soil organic carbon content after experiment (A) (Mg C ha ⁻¹)	Soil organic carbon content before experiment (B) (Mg C ha ⁻¹)	Soil organic carbon budget (A-B) (Mg C ha ⁻¹)
2014	NPK	10.90		1.34
	NPK + Hairy vetch	12.73	9.56	3.17
	NPK + Rice straw compost	12.18		2.62
2015	NPK	12.02	10.90	1.12
	NPK + Hairy vetch	16.24	12.18	4.06
	NPK + Rice straw compost	17.38	12.73	4.65
2016	NPK	15.33	12.02	3.31
	NPK + Hairy vetch	22.63	16.24	6.39
	NPK + Rice straw compost	23.88	17.38	6.50

Table 7. Soil organic carbon budget for each inventory time period under different fertilization (IPCC 2006 GL)

Treatments	Soil organic carbon after experiment (2016) (A) (Mg C ha ⁻¹)	Soil organic carbon before experiment (2014) (B) (Mg C ha ⁻¹)	Soil organic carbon budget (A-B) (Mg C ha ⁻¹)
NPK	3.31	1.34	1.97
NPK + Hairy vetch	6.39	3.17	3.22
NPK + Rice straw compost	6.50	2.62	3.88

축적량을 감한 양이 최종 토양 유기탄소 축적량이 산출된다 (Table 7). 이와 같은 결과로 벼 재배지 토양 유기탄소 축적량은 NPK + 벼짚퇴비 처리 (3.88 Mg C ha⁻¹)에서 가장 많았고 NPK (화학비료) 처리보다 40.8%, NPK + 헤어리베치 처리보다 17.0%의 축적 효과가 있었다. 그러나 NPK + 벼짚퇴비 처리가 NPK + 헤어리베치에 비해 토양 유기탄소 축적량이 높게 나타나 벼짚퇴비 시용이 헤어리베치 시용에 비해 농경지 내 탄소 축적량을 높이고, 동시에 수용성 유기탄소의 제외(界外) 유출 위험도는 낮아질 것으로 판단된다는 Yun *et al.* (2012)의 보고와 일치 하였다. 또한 C/N율은 토양 유기탄소 증대와 밀접하게 관련 있으며 바이오메스 품질 (Mirsky *et al.* 2008)과 바이오메스 분해율을 결정하는 중요한 요인 (Kemp *et al.* 2003)이라고 하여, 헤어리베치에 비해 C/N율이

높은 벼짚퇴비 처리에서 토양 유기탄소 축적량이 높게 나타난 결과와도 일치하였다.

Table 8은 벼 수량과 토양유기 탄소 함량은 벼 재배기간 3년 동안 평균하여 단위 수량 당 토양 유기탄소 함량을 나타낸 것이다. NPK + 헤어리베치 처리가 NPK 처리와 NPK + 벼짚퇴비 처리에 비해 벼 정조 수량이 많았으나 단위 수량 당 토양 유기탄소 함량은 NPK + 벼짚퇴비 처리가 두 처리에 비해 많았으며, 이는 NPK + 헤어리베치 처리에 비해 수량은 낮으나 토양 유기탄소 축적량이 많은 NPK + 벼짚퇴비 처리가 더욱 효과적이라 할 수 있다. 특히 NPK + 헤어리베치 처리에 비해 NPK + 벼짚퇴비에서 토양 유기탄소 함량이 많은 것은 헤어리베치에 비해 C/N율이 크고 분해속도가 느린 벼짚퇴비의 특성이라고 하였다 (Fageria 2007).

Table 8. Yield of unhulled rice and soil organic carbon per unit grain yield in paddy soil under different fertilization for the 3-year average during rice cultivation period (2014–2016)

Treatments	Soil organic carbon (kg ha ⁻¹)	Yield of unhulled rice (Mg ha ⁻¹)	Soil organic carbon per unit grain yield (kg Mg ⁻¹)
NPK	1,973	5.72	344.9
NPK + Hairy vetch	3,221	7.14	451.1
NPK + Rice straw compost	3,879	6.43	603.3

Table 9. Net primary production (NPP) for different stages during rice cultivation period (2014–2016)

Year	Treatments	Nursery –Rooting (Mg C ha ⁻¹)	Rooting –Tillering (Mg C ha ⁻¹)	Tillering –Internode elongation (Mg C ha ⁻¹)	Internode elongation –Ripening –Harvest (Mg C ha ⁻¹)	Total growing period (Mg C ha ⁻¹)
2014	NPK	0.49	0.65	5.02	4.23	10.39
	NPK + Hairy vetch	0.58	0.85	6.82	6.15	14.40
	NPK + Rice straw compost	0.59	0.81	6.32	5.16	12.88
2015	NPK	0.41	1.09	4.68	7.45	13.64
	NPK + Hairy vetch	0.41	1.91	4.31	9.91	16.54
	NPK + Rice straw compost	0.40	1.40	4.66	9.55	16.01
2016	NPK	0.40	0.34	2.57	9.71	13.03
	NPK + Hairy vetch	0.40	0.44	3.27	11.57	15.68
	NPK + Rice straw compost	0.40	0.38	3.49	8.86	13.14

2. 벼 재배지 생태계 순 생산량

농경지 생태계에서 CO₂ 수지를 산정하기 위해서는 먼저 경작지 토양의 타가호흡 (Heterotrophic Respiration: HR), 순 1차 생산량 (Net Primary Production: NPP) 그리고 생태계 순 생산량 (Net Ecosystem Production: NEP)을 파악해야 한다. 농업생태계에서 토양과 작물은 토양호흡과 작물의 생장을 통해 상당량의 탄소를 저장 또는 배출하고 있다 (Schlesinger 2000). 따라서 작물 생산량과 토양 호흡량 그리고 양분의 시비량에 따른 탄소 수지의 계절별 변화의 정확한 측정은 경작지에서 대기로 배출되는 탄소 수지를 구명하는 데 있어서 매우 중요하다. Table 9는 3년 동안 양분 처리별 벼 작물의 순 일차생산량(NPP)은 NPK + 헤어리베치 처리구에서 가장 높았으며, NPK + 헤어리베치 > NPK + 벗짚퇴비 > NPK 순으로 나타났다. 이는 벗짚에 비해 C/N율이 낮은 헤어리베치는 토양에서 유기물의 분해속도가 빨라 양분의 유효도와 비료 이용효율이 높아 초기생육이 양호한 것에 기인한다고 하였다 (Cho *et al.* 2012). 이와 유사한 결과로 Yun *et al.* (2010)도 가축분 및 가축분 + 톱밥을 연용한 토양의 질소 무기화 시험에서 C/N율이 상대적으로 낮은 가축분 처리구에서 질소의 무기화량이 높았으며, C/N율이 높은 가축분 + 톱밥 처리구에서 유기태 질소의 분해율이 낮음을 보고하였으며, 작물의

바이오매스 생산량도 C/N율이 벗짚퇴비에 비해 상대적으로 낮고 질소의 무기화량이 높은 헤어리베치 처리에서 높은 것으로 판단하였다. 그리고 생육단계별 순 일차생산량은 벼의 생장과 더불어 유수발육기부터 급격히 증가하여 등숙기 초기인 8월 하순에 가장 높게 나타나 유수발육기~등숙기~수확기 단계가 높았다. 이와 같은 결과는 Shim *et al.* (2015)의 연구결과와 유사하였다.

Table 10은 연도별 벼 생육기간의 토양의 타가호흡량(HR)을 나타낸 표이다. 2016년을 제외하고 2014~2015년에는 NPK + 헤어리베치 처리구에서 타가호흡량이 많았다. 토양 호흡량은 유기물의 C/N율이 낮을수록 그리고 부숙 속도가 빠를수록 증가한다고 하였는데 (Yagi *et al.* 1990; Lim *et al.* 2012), 본 연구결과에서 벗짚퇴비에 비해 유기물의 C/N율이 낮은 NPK + 헤어리베치 처리가 NPK + 벗짚퇴비처리보다 7.3~14.2%가 타가호흡량이 많았다. 벼 생태계 순 생산량(NEP)은 Table 11에서 나타난 바와 같다. 벼 생태계 순 생산량(NEP)은 대체적으로 첫해보다 해가 거듭될수록 증가하였고, NPK + 헤어리베치 처리에서 벼 생태계 축적량이 가장 많았다. NPP는 식물체에 함유된 탄소함량인데 유수발육기~등숙기~수확기에서 광합성에 의한 동화작용의 결과로 대기 중의 CO₂를 가장 많이 고정하였고, 다음으로 분얼기~유수발육기, 활착기~분얼기, 이앙~활착기 순이었다. 벼는 생태

Table 10. Heterotrophic Respiration (HR) for different stages during rice cultivation period (2014–2016)

Year	Treatments	Nursery –Rooting (Mg C ha ⁻¹)	Rooting –Tillering (Mg C ha ⁻¹)	Tillering – Internode elongation (Mg C ha ⁻¹)	Internode elongation –Ripening –Harvest (Mg C ha ⁻¹)	Total growing period (Mg C ha ⁻¹)
2014	NPK	0.02	0.15	0.38	0.31	0.96
	NPK + Hairy vetch	0.03	0.27	0.58	0.43	1.41
	NPK + Rice straw compost	0.05	0.21	0.53	0.41	1.21
2015	NPK	0.01	0.60	0.08	0.48	1.16
	NPK + Hairy vetch	0.10	0.93	0.63	0.54	2.20
	NPK + Rice straw compost	0.05	0.79	0.63	0.57	2.04
2016	NPK	0.30	0.26	0.17	0.17	0.90
	NPK + Hairy vetch	0.28	0.24	0.17	0.12	0.81
	NPK + Rice straw compost	0.18	0.31	0.13	0.09	0.70

Table 11. Net Ecosystem Product (NEP) for different stages during rice cultivation period (2014–2016)

Year	Treatments	Parameter (Mg C ha ⁻¹)	Nursery –Rooting (Mg C ha ⁻¹)	Rooting –Tillering (Mg C ha ⁻¹)	Tillering – Internode elongation (Mg C ha ⁻¹)	Internode elongation –Ripening –Harvest (Mg C ha ⁻¹)	Total growing period (Mg C ha ⁻¹)
2014	NPK	NEP ¹	0.47	0.50	4.64	3.92	9.43
		HR ²	0.02	0.15	0.38	0.31	0.96
		NPP ³	0.49	0.65	5.02	4.23	10.39
	NPK + Hairy vetch	NEP	0.55	0.58	6.24	5.72	12.99
		HR	0.03	0.27	0.58	0.43	1.41
		NPP	0.58	0.85	6.82	6.15	14.40
	NPK + Rice straw compost	NEP	0.54	0.60	5.89	4.75	11.67
		HR	0.05	0.21	0.43	0.41	1.21
		NPP	0.59	0.81	6.32	5.16	12.88
2015	NPK	NEP	0.40	0.49	4.60	6.97	12.48
		HR	0.01	0.60	0.08	0.48	1.16
		NPP	0.41	1.09	4.68	7.45	13.64
	NPK + Hairy vetch	NEP	0.31	0.98	3.68	9.37	14.34
		HR	0.10	0.93	0.63	0.54	2.20
		NPP	0.41	1.91	4.31	9.91	16.54
	NPK + Rice straw compost	NEP	0.35	0.61	4.03	8.98	13.97
		HR	0.05	0.79	0.63	0.57	2.04
		NPP	0.40	1.40	4.66	9.55	16.01
2016	NPK	NEP	0.10	0.08	2.40	9.54	12.13
		HR	0.30	0.26	0.17	0.17	0.90
		NPP	0.40	0.34	2.57	9.71	13.03
	NPK + Hairy vetch	NEP	0.12	0.20	3.10	11.45	14.87
		HR	0.28	0.24	0.17	0.12	0.81
		NPP	0.40	0.44	3.27	11.57	15.68
	NPK + Rice straw compost	NEP	0.22	0.07	3.36	8.77	12.44
		HR	0.18	0.31	0.13	0.09	0.70
		NPP	0.40	0.38	3.49	8.86	13.14

¹Net Ecosystem Product, ²Heterotrophic Respiration, ³Net primary production

계의 CO₂ 교환에 대한 연구에서 NEP는 7월 하순~8월 상순에 최대값이 나타났으며, 이는 벼-보리 이모작 논에서 벼 재배기간 동안의 CO₂ 플럭스의 계절적 변화 연구에서 여름철에 NEP가 최대로 나타났다는 Min *et al.* (2013)의 결과와 유사하였다.

벼논에서 CH₄로 배출 유래 탄소의 양을 파악하기 위하여 CH₄ 배출량을 조사하였다(Table 12). CH₄ 배출량을 탄소 배출량으로 환산한 탄소 배출량 변화는 활착기~유수발육기까지 CH₄ 배출 유래 탄소배출량이 높게 나타났다. 화학비료보다 유기물인 헤어리베치 생초와 볏짚퇴비 처리구에서 CH₄ 배출 유래 탄소배출이 높은 것은 담수 시에 혐기상태에서 혐기성균에 의해 유기물이 분해되어 CH₄가 더 많이 발생되기 때문이다(Schütz *et al.* 1989; IPCC 1996; Yagi *et al.* 1996). CH₄ 배출 유래 탄소배출량은 볏짚퇴비에 비해 C/N율이 낮은 헤어리베치 처리에서 탄소배출량이 높을 것으로 예상하였으나, NPK + 헤어리베치 처리보다 NPK + 볏짚퇴비 처리구에서 탄소배출량이 높았다. NPK + 볏짚퇴비 처리에서 탄소 배출량이 높은 원인으로는 유기물 투입량이 NPK + 헤

어리베치와 NPK + 볏짚퇴비 처리에서 질소량 기준으로 투입량을 설정하였고, 시험포장에 투입된 유기물의 탄소함량은 헤어리베치에 비해 볏짚퇴비 처리에서 5배 이상 많았으므로 더 많은 CH₄ 생성으로 인해서 CH₄ 배출량이 더 높게 나타난 것으로 사료된다. Pramanik *et al.* (2014)와 Pandey *et al.* (2014), Roh *et al.* (2010) 그리고 Yagi *et al.* (1990)도 CH₄는 토양에 환원된 유기물이 부속된 퇴비보다는 신선한 유기물(유기물 생초)에서 더 많이 발생되며, 투입되는 유기물의 양이 많을수록 증가한다고 하였다. 그러나 토양에 유기물 투입량이 NPK + 헤어리베치 처리에 비해 NPK + 볏짚퇴비 처리에서 약 5배 이상 높게 투입이 되었음에도 불구하고 CH₄ 배출량은 약 2배 못 미쳐 증가되었는데, 그 원인으로는 Tables 6, 7에서 NPK + 헤어리베치 처리에 비해 NPK + 볏짚퇴비 처리에서 토양 유기탄소 측정량이 많은 것으로 보아 CH₄ 배출량이 적은 대신 투입된 유기물의 분해가 느리고 분해가 덜된 유기물이 토양에 유기탄소로 서서히 축적된 것으로 판단된다(Fageria 2007; Choi *et al.* 2010).

Table 13은 연도별 벼 생태계 탄소 축적량(NEP)을 산정

Table 12. Carbon content caused by use of CH₄ emission for different stages during rice cultivation period (2014–2016)

Year	Treatments	Nursery –Rooting (kg C ha ⁻¹)	Rooting –Tillering (kg C ha ⁻¹)	Tillering –Internode elongation (kg C ha ⁻¹)	Internode elongation –Ripening –Harvest (kg C ha ⁻¹)	Total growing period (kg C ha ⁻¹)
2014	NPK	3.13	13.46	17.23	5.00	38.82
	NPK + Hairy vetch	4.66	19.50	20.14	10.31	54.61
	NPK + Rice straw compost	8.17	20.25	43.54	23.71	95.67
2015	NPK	1.18	19.84	14.19	9.55	44.76
	NPK + Hairy vetch	1.42	24.44	12.83	18.76	57.45
	NPK + Rice straw compost	5.88	27.36	40.48	25.31	99.03
2016	NPK	1.63	23.74	9.21	3.33	37.91
	NPK + Hairy vetch	1.04	26.81	16.16	11.85	55.86
	NPK + Rice straw compost	2.79	29.82	37.30	14.58	84.49

Table 13. Carbon budget in paddy field ecosystem during rice cultivation period (2014–2016)

Year	Treatments	Net Ecosystem Product (NEP) (A) (Mg C ha ⁻¹)	Carbon content caused by use of CH ₄ emission (B) (Mg C ha ⁻¹)	Carbon budget in paddy field ecosystem (A-B) (Mg C ha ⁻¹)
2014	NPK	9.43	0.039	9.39
	NPK + Hairy vetch	12.99	0.055	12.94
	NPK + Rice straw compost	11.67	0.096	11.57
2015	NPK	12.48	0.045	12.43
	NPK + Hairy vetch	14.34	0.057	14.28
	NPK + Rice straw compost	13.97	0.099	13.87
2016	NPK	12.13	0.038	12.09
	NPK + Hairy vetch	14.87	0.056	14.81
	NPK + Rice straw compost	12.44	0.084	12.36

Table 14. Carbon budget in paddy field ecosystem for the 3-year average during rice cultivation period (2014–2016)

Treatments	Net Ecosystem Product (NEP) (A) (Mg C ha ⁻¹)	Carbon content caused by use of CH ₄ emission (B) (Mg C ha ⁻¹)	Carbon budget in paddy field ecosystem (A-B) (Mg C ha ⁻¹)
NPK	11.35	0.041	11.31
NPK + Hairy vetch	14.07	0.056	14.01
NPK + Rice straw compost	12.69	0.093	12.60

하였다. 생태계 순 생산량은 벼논에서 CH₄ 배출에 의해서도 탄소가 발생하기 때문에 CH₄으로 유래된 탄소를 감한 값을 벼 생태계 탄소 축적량으로 나타냈다. 벼 전체 생육기간 동안 NPK + 헤어리베치 처리에서 벼 생태계 탄소 축적량이 가장 많았다(12.84~14.81 Mg C ha⁻¹). Table 14는 전체 생육기간 동안 벼 생태계 탄소 축적량을 나타낸 표이다. 토양으로부터 탄소배출, 작물의 탄소함량과 CH₄ 배출 등을 포함한 벼 재배지 생태계 탄소 축적량은 NPK 처리(11.31 Mg C ha⁻¹)에 비해 NPK + 헤어리베치 처리(14.01 Mg C ha⁻¹)에서 19.3%, NPK + 벚짚퇴비 처리(12.6 Mg C ha⁻¹)에서 10.2% 축적 효과가 있었다. 따라서 화학비료 단일 처리보다는 화학비료를 절감한 유기물 처리가 토양유기탄소 축적과 재배지의 작물 생태계 내에서 바이오매스의 탄소 축적량을 증대시키는 효과가 있는 것으로 나타났다.

온실가스의 농도 증가에 따른 지구온난화로 기후변화와 환경적 영향이 증가하고 있으며, 산업 분야별로 온실가스 저감 노력이 계속 되고 있다. 농경지에서 온실가스 배출 저감 및 탄소 수지 연구를 통하여 농업생산 활동이 온실가스를 배출하는 행동 이외에도 탄소를 고정 또는 축적 기능이 있다는 것을 밝히고자 하였다. 앞으로 농경지에서의 토양의 탄소 배출, 작물의 탄소고정과 토양의 유기탄소 축적을 통한 탄소 수지연구의 기초 데이터로 사용될 수 있을 것으로 예상된다.

적 요

토양 유기탄소 축적량 변화와 작물의 생태계 탄소 수지를 파악하기 위하여 농업의 탄소 관리에 필요한 기초 자료 마련을 위하여 2014~2016년(3년) 벼 재배기간 동안 토양의 유기탄소 축적량과 작물의 생태계 순 생산량을 측정하였다. 그 결과로 벼 재배지 토양 유기탄소 축적량은 NPK + 벚짚퇴비 처리(3.88 Mg C ha⁻¹)에서 가장 많았고 NPK(화학비료) 처리보다 40.8%, NPK + 헤어리베치 처리보다 17.0%의 축적 효과가 있었다. 그러나 NPK + 벚짚퇴비 처리가 NPK + 헤어리베치에 비해 토양 유기탄소 축적량이 높게 나타나 헤어리베치 시용에 비해 벚짚퇴비 시용이 농경지 내 탄소 축적

량이 높은 것으로 나타났다. 벼 재배지 생태계 순 생산량은 NPK 처리(11.31 Mg C ha⁻¹)에 비해 NPK + 헤어리베치 처리(14.01 Mg C ha⁻¹)에서 19.3%와 NPK + 벚짚퇴비 처리(12.6 Mg C ha⁻¹)에서 10.2% 축적 효과가 있었다. 따라서 화학비료 단일 처리보다 화학비료를 절감하기 위한 유기물 처리가 토양유기탄소 축적 및 재배지의 작물 생태계 탄소 축적량을 증대시키는 효과가 있는 것으로 나타났다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업(과제번호: PJ012614)의 지원에 의해 이루어진 것임.

REFERENCES

- Baldocchi D. 2008. Breathing of the terrestrial biosphere: Lessons learned from a global network of carbon dioxide flux measurement systems. *Aust. J. Bot.* 56:1-26.
- Baldocchi D, E Falge, L Gu, R Olson, D Hollinger, S Running, P Anthoni, C Bernhofer, K Davis, R Evans, J Fuentes, A Goldstein, G Katul, B Law, X Lee, Y Malhi, T Meyers, W Munger, W Oechel, UKT Paw, K Pilegaard, HP Schmid, R Valentini, S Verma, T Vesala, K Wilson and S Wofsy. 2001. FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 82:2415-2434.
- Bond-Lamberty B, C Wang and ST Gower. 2004. Contribution of root respiration to soil surface CO₂ flux in a boreal black spruce chronosequence. *Tree Physiol.* 24:1387-1395.
- Bruce JP, M Frome, E Haites, H Janzen, R Lal and K Paustian. 1999. Carbon sequestration in soil. *J. Soil Conserv.* 54:382-389.
- Cambell CA, HH Janzen, K Paustian, EG Gregorich, L Sherrod, BC Liang and RP Zentner. 2005. Carbon storage in soils of the North American Great Plains: Effect of crop-

- ping frequency. *Agron. J.* 97:349–363.
- Cho JL, HS Choi, Y Lee, SM Lee and SK Jung. 2012. Effect of organic materials on growth and nitrogen use efficiency of rice in paddy. *Korean J. Org. Agric.* 20:211–220.
- Choi B, JA Jung, MK Oh, SH Jeon, HG Goh, YS Ok and JK Sung. 2010. Effects of green manure crops on improvement of chemical and biological properties in soil. *Korean J. Soil Sci. Fertil.* 43:650–658.
- Desjardins RL, WN Smith, B Grant, CA Campbell and R Riznek. 2005. Management strategies to sequester carbon in agricultural soils and to mitigate greenhouse gas emission. *Increasing Climate Variability and Change* 70:283–297.
- Fageria NK. 2007. Green manuring in crop production. *J. Plant Nutr.* 30:691–719.
- Follett RF. 2001. Soil management concept and carbon sequestration in cropland soils. *Soil Tillage Res.* 61:77–92.
- Gregorich EG, P Rochette, AJ VandenBygaart and DA Angers. 2005. Greenhouse gas contribution of agricultural soils and potential mitigation practice in Eastern Canada. *Soil Tillage Res.* 83:53–72.
- Guanhui L and RE James. 1999. Elevated CO₂ and temperature impacts on different components of soil CO₂ efflux in Douglas-fir terracosms. *Glob. Change Biol.* 5:157–168.
- Hutchinson JJ, CA Cambell and RL Desjardins. 2007. Some perspectives on carbon sequestration in agriculture. *Agri. For. Meteorol.* 142:288–302.
- IACGEC. 1996. UK National Strategy for GER. Inter-Agency Committee on Global Environmental Change. Report of Expert Panel.
- IGBP. 1998. Terrestrial Carbon Working Group. The terrestrial carbon cycle: Implications for the Kyoto Protocol. *Science* 280:1393–1394.
- IPCC. 1996. Revised IPCC guideline for national greenhouse gas inventories: Reference Manual, revised in 1996, IPCC.
- IPCC. 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (Chapter 2). In : Generic methodologies applicable to multiple land-use categories, vol. 4. Soil C estimation method, 2. 3. 3. 1.
- IPCC. 2007. Climate change 2007: the physical science basis, contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press. Cambridge.
- Kemp AH, MA Gray, P Line, RB Silberstein and PJ Nathan. 2003. Preliminary electrophysiological evidence for modulation of the processing of negative affect by serotonin. *Brain Cogn.* 51:198–200.
- Kim G and C Kim. 1998. Research trends on forest biomass production in Korea. *J. Kor. For. En.* 8:94–107.
- Lee NY. 2012. Estimation of carbon storage in three cool temperature broad-leaved deciduous forests at Jirisan National Park, Korea. *Korean J. Environ. Biol.* 30:121–127
- Lim HW, WJ Choi, K Ahn and KH Lee. 2012. Ecosystem respiration and tree growth influenced by thinning in a red pine forest in southern Korea. *Forest Sci. Technol.* 8:192–204.
- Lou Y, Z Li, T Zhang and Y Liang. 2004. CO₂ emissions from subtropical arable soils of China. *Soil Biol. Biochem.* 36:1835–1842.
- Melillo JM, IC Prentice, GD Farquhar, ED Schulze and OE Sala. 1995. Terrestrial biotec responses to environmental change and feedbacks to climate. In *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*, Ed. IT Houghton *et al.*, Cambridge University Press, Cambridge. pp. 445–481.
- Minami K and K Yagi. 1988. Method for measuring methane Oux from rice paddies. *Jp. J. Soil Sci. Pla. Nulr.* 59:458–463. (In Japanese with English summary).
- Min SH, KM Shim, YS Kim, MP Jung, SC Kim and KH So. 2013. Seasonal variation of carbon dioxide and energy fluxes during the rice cropping season at rice-barley double cropping paddy field of Gimje. *Korean J. Agric. For. Meteorol.* 15:273–281.
- Mirsky R, A Woodhoo, DB Parkinsinson, P Arther-Farraj, A Bhaskaran and KR Jessen. 2008. Novel signals controlling embryonic Schwann cell development, myelination and dedifferentiation. *J. Peripher. Nerv. Syst.* 13:122–135.
- NAAS. 2010. Methods of Soil Chemical Analysis. National Academy of Agricultural Science. Sam-Mi press. pp. 20–214.
- Pandey A, VT Mai, DQ Vu, TPL Bui, TLA Mai, LS Jensen and AD Neergaard. 2014. Organic matter and water management strategies to reduce methane and nitrous oxide emissions from rice paddies in Vietnam. *Agric. Ecosyst. Environ.* 196:137–146.
- Pramanik P, MDM Haque, SY Kim and PJ Kim. 2014. C and N accumulations in soil aggregates determine nitrous oxide emissions from cover crop treated rice paddy soils during fallow season. *Sci. Total Environ.* 490:622–628.
- Raich JW and WH Schlesinger. 1992. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus* 44:81–99.
- RDA. 2006. Fertilizer recommendation standards for various crops. Rural Development Administration, Korea. Sanglok-sa. pp. 16–17.
- Roh KA, HC Jeong, GY Kim, KH So, KM Shim, DS Lee and YH Kim. 2010. Estimation of carbon sequestration and methane emission with organic amendment application at agricultural soil in Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert. fall con-*

- ference. pp. 156–157. (in Korean)
- Rolston D. 1986. Gas flux. *Methods of Soil Analysis: Part 1 - Physical and mineralogical methods*. pp. 1103–1119.
- Schlesinger WH. 2000. Carbon sequestration in soils: some caution amidst optimism. *Agric. Ecosyst. Environ.* 82:121–127.
- Schütz H, A Holzapfel-Pschorn, R Conrad, H Rennenberg and W Seiler. 1989. A 3 year continuous record on the influence of daytime, season and fertilizer treatment on methane emission rates from an Italian rice paddy field. *J. Geophys. Res. -Atmos.* 94:16405–16415.
- Sebacher DI and RC Harris. 1980. A continuous sampling and analysis system for monitoring methane fluxes from soil and water surfaces to the atmosphere. 73rd Ann. Meet. Air Pollut. Control Assoc., Montreal, Quebec. p. 16.
- Shim KM, SH Min, YS Kim, MP Jung and IT Choi. 2015. Estimation of Net Biome Production in a Barley-Rice Double Cropping Paddy Field of Gimje, Korea. *Korean J. Agric. For. Meteorol.* 17:173–181.
- Shin YK, YS Lee, SH Yun and ME Park. 1995. A simplified closed static chamber method for measuring methane flux in paddy soils. *Korean Soc. Soil Sci. Fertil.* 28:183–190.
- Suh SU, YM Chun, NY Chae, J Kim, JH Lim, M Yokozawa, MS Lee and JS Lee. 2006. A chamber system with automatic opening and closing for continuously measuring soil respiration based on an open-flow dynamic method. *Ecol. Res.* 21:405–414.
- Thomson AM, RC Izaurralde, NJ Rosenberg and X He. 2006. Climate change impacts on agriculture and soil carbon sequestration potential in the Huang-Hai Plain of China. *Agric. Ecosyst. Environ.* 114:195–209.
- 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.
- Waring RH and SW Running. 1998. *Forest ecosystems: analysis at multiple scales*. Academic Press.
- Yagi K. 1991. Emission of biogenic gas compounds from soil ecosystem and effect of global environment. 2. Methane emission from paddy fields. *Soil. Fert. Japan.* 62:556–562.
- Yagi K, K Minami and Y Ogawa. 1990. Effects of water percolation on methane emission from paddy field. *NIAES. Res. Rep. Div. Environ. Planning.* 6:105–122.
- Yagi K, T Haruo, K Kenichi and M Katsuyuki. 1996. Effect of water management on methane emission from a Japanese rice paddy field: Automated methane monitoring. *Global Biogeochem. Cycle* 10:255–267.
- Yun HB, SM Lee, JS Lee, YJ Lee, MS Kim and YS Song. 2012. Soil carbon accumulation at soil depth affected by different types of input organic sources in upland soil. *Korean J. Soil Sci.* conference abstract, p. 143.
- Yun HB, Y Lee, CY Yu, JE Yang, SM Lee, JH Shin, SC Kim and YB Lee. 2010. Soil nitrogen mineralization influenced by continuous application of livestock manure composts. *Korean J. Soil. Sci. Fertil.* 43:329–334.

Received: 2 November 2017

Revised: 13 December 2017

Revision accepted: 18 December 2017