Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association, 28(1), pp.73-82 (2020)
ISSN 1225-6498 eISSN 2508-3015 https://doi.org/10.17137/korrae.2020.28.1.73

Original Paper

유기 논토양의 토양탄소 저장효과 평가

한양수[a], 남홍식[b], 박광래[b], 이영미[b], 이병모[b], 박기춘[c†]

Evaluation of Soil Carbon Storages in the Organic Farming Paddy Fields

Yangsoo Han[a], Hong-shik Nam[b], Kwang-lai Park[b], Youngmi Lee[b], Byung-mo Lee[b], Kee-choon Park[c†]

(Received: Dec. 26, 2019 / Revised: Mar. 18, 2020 / Accepted: Mar. 18, 2020)

ABSTRACT: This study was conducted to investigate the differences in carbon storage capacity of soil between the conventional and the organic agricultural cultivation followed by the assessment of their economic values. An analysis of 107 samples in the organic and the conventional rice cultivation soils in six regions across South Korea showed that the five regions, Buyeo-II, Gimhae, Sancheong-I, II and Suncheon, had higher organic soil carbon contents than those of values observed on the conventional soils with the exception of the Buyeo-I areas. Based on the results from soil carbon contents, the carbon storage were estimated to be 36.1 megagram carbon (MgC) per ha in the organic paddy soils, while its conventional paddy soils were 29.4 MgC per ha. It showed that the organic paddy soils were 23 % greater than that of its conventional paddy soils. It was estimated that the carbon trading price for economic assessment was ₩758,100 per ha in the organic paddy soil and ₩617,400 per ha in the conventional paddy soil.

Keywords: Soil Carbon, Organic Farming, Soil Carbon Storage, Reduction of Green-house Gases

초 록: 본 연구는 토양의 탄소저장 능력과 관련하여 유기 및 관행 재배에 따른 차이를 비교분석하고, 이를 바탕으로 예측된 토양탄소 저장량에 대한 경제적 가치를 평가하고자 2018년 3월부터 5월 사이에 수행하였다. 전국 6개 지역에서 107개의 유기 및 관행 벼 재배토양을 분석한 결과 부여-I 지역을 제외하고, 나머지 5개 지역(부여-II, 김해, 산청-I, II, 순천)은 유기토양의 탄소 함량이 관행토양 탄소함량보다 높게 나타났다. 이를 바탕으로 토양탄소 저장량을 분석한 결과, 유기토양(36.1 MgC ha^{-1})이 관행토양(29.4 MgC ha^{-1})보다 약 23 % 많은 토양탄소를 저장한 것으로 나타났다. KOSIS (KOrea Statistical Information Service)의 탄소배출권 가격으로 추정한 유기 및 관행 재배의 단위 면적당 토양탄소 저장량에 대한 경제적 가치는 유기토양 758,100원 ha^{-1}과 관행토양 617,400원 ha^{-1}으로 나타났고, 우리나라 전체 논토양의 탄소저장량 가치는 5,281억 원이며, 이 중 친환경논토양의 가치는 367억 원, 관행논토양의 가치는 4,914억 원으로 추정되었다. 우리나라 전체 논토양의 5.7 %인 친환경논토양의 면적을 확대하는 것이 전체 논토양의 탄소저장량 가치를 향상시키는데 효과적이라 판단된다.

주제어: 토양탄소, 유기농업, 탄소저장량, 온실가스 감축

[a] 국립농업과학원 유기농업과 박사후연구원(Post Doctor, Organic Agriculture Division, National Institute of Agricultural Sciences)
[b] 국립농업과학원 유기농업과 농업연구사(Agricultural researcher, Organic Agriculture Division, National Institute of Agricultural Sciences)
[c] 국립농업과학원 토양비료과 농업연구관(Agricultural senior researcher, Soil and Fertilizer Division, National Institute of Agricultural Sciences)

† Corresponding author(e-mail: kcped2@korea.kr)

1. 서 론

국제사회의 기후변화 대응 및 농산물 안전성에 대한 인식 확대로 인한 친환경농산물 생산 기반인 유기농업에 대한 소비자들의 관심은 증가되고 있다. 2005년부터 2015년까지 국내 총 경지 면적 중 유기농재배 면적 비율은 0.3%에서 1.0%로 크게 늘어났지만, 여전히 농경지 대부분이 유기농이 아닌 관행농법으로 관리되고 있다[28]. 유기농업은 생물다양성 유지, 토양오염 방지 및 수질개선, 토양비옥도 증진, 온실가스 감축 등 여러 환경보전 기능을 나타내지만[3] 다양한 환경 변수 및 복잡한 지중 생태계 정보의 부족 등 해결해야 할 난제들이 존재한다. 특히 기후변화에 대응한 온실가스 배출 저감을 위하여 다양한 농경지 형태에 따른 탄소 저장능력 및 온실가스 배출량에 대한 많은 연구가 수행되고 있다.

농경지 및 초지에 저장될 수 있는 유기물의 양은 매우 크며[4],[34], 토양탄소는 토양비옥도의 유지와 농업생태계의 안정적인 생산능력에 매우 중요하다[17],[40]. 토양탄소는 지구 탄소 순환에 중요한 역할을 하며[36], 지구의 이산화탄소 물질평형에서 토양에 저장되어 있는 약 2.5±0.9 GtC yr^{-1}의 탄소가 이산화탄소로 전환되며, 일부는 토양으로 흡수될 수 있다[23]. 지구 토양의 탄소량은 2,500 Gt으로 대기의 총 탄소량(760 Gt)의 3.3배, 생물체(560 Gt)의 4.5배로 토양탄소 저장량의 변화가 대기의 온실가스 농도에 미치는 영향은 큰 것으로 보고되어있다[18],[19],[36]. Hong 등은 우리나라의 총 탄소저장량은 413 GgC이며, 논과 밭 등 농경지의 총 탄소저장량은 157 GgC로 평가하였고[7], Park 등은 2006 IPCC 지침을 적용하여 1990년 323 Gg CO_2부터 2016년 9,749 Gg CO_2까지 농경지 온실가스 배출량을 분석하였다[33]. 또한 Kim 등은 농촌진흥청의 토양환경정보시스템을 이용하여 단위면적 당 탄소함량을 분석하여 전국 토양을 5등급으로 분류하였고, 논토양의 탄소저장량의 경제적 가치를 3.7조원으로 제시하였다[14]. 특히 Gattinger 등은 국제적인 78개의 연구결과를 분석하여 유기토양에서 관행토양보다 탄소함량(0.18±0.06%), 탄소저장량(3.50±1.08 MgC ha^{-1}), 그리고 탄소격리율(0.45±0.21 MgC ha^{-1} y^{-1})이 높게 나타난다고 보고하였으나[5] 이러한 재배방식 또는 경운방식 등 세부적인 농업활동에 의해 변화하는 토양탄소 저장량에 관한 국내 연구는 거의 없는 실정이다. 따라서 국내 유기와 관행재배에 의한 정확한 토양탄소의 저장능력을 분석하기 위한 연구 및 이를 통한 자료의 축적이 필요하다. 토양탄소 저장량에 기초한 토양탄소의 경제적 가치 산출은 기후변화 대응을 위해 일부 국가에서 시행 중이며 우리나라에서도 도입 준비 중인 탄소배출권 거래 등 향후 국가 정책을 대비하는데 매우 중요하다.

본 연구는 유기와 관행 재배가 논토양의 탄소저장량에 미치는 영향을 밝히는 것을 목표로 하였다. 전국 6개 지역(부여 2, 김해 1, 산청 2, 순천 1)에 위치한 107개의 유기와 관행 벼 재배 논토양의 탄소함량을 분석하여 탄소저장량을 산정하였고, 탄소배출권 거래가격을 적용하여 단위 면적당 탄소저장량의 경제적 가치를 평가함으로 유기농업의 환경보전 가치 및 기후변화 관련 농업분야의 대응에 대한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 유기 벼 재배 농가 선정

유기 벼 재배에 따른 토양탄소 농도의 비교 및 저장량을 평가하기 위하여 국립농산물품질관리원의 유기인증을 바탕으로 수도권 및 강원을 제외한 각 권역의 지역이 조사대상에 포함될 수 있도록 부여 2, 김해 1, 산청 2, 순천 1개 지역의 유기 벼 재배단지를 선정하여 재배이력, 양분관리 및 재배 현황 등을 조사하였다. 각 지역별 관행 논토양은 4에서 12개, 유기 논토양은 10에서 15개의 필지를 선정하였고, 유기 및 무농약으로 인증된 필지 외는 모두 관행 필지로 간주하였다(Table 1).

2.2. 토양시료 채취 및 화학성 분석

토양시료는 2019년 4월과 5월에 걸쳐 벼 이앙기 물대기 전 15 ㎝ 깊이의 표토를 1회씩 총 107점을 채취하였다. 표토 시료는 15 ㎝ Hand auger (Sing Edelman auger, Eijkelkamp Soil & Water, Netherlands)를 이용

Table 1. Conventional and Organic Farming Paddy Field in this Study

Region	Number of paddy field		Period of organic farming (yr)	Type of fertilizer		Cropping system
	CON†	ORG†		CON†	ORG†	
BUYEO-I (N36°16`, E126°59`)	5	10	2	Oil cake (4 ton ha^{-1})	Oil cake (4 ton ha^{-1})	Rice-(HV††† per 2yr)
BUYEO-II (N36°16`, E126°51`)	4	14	2	NPK††	Oil cake (6 ton ha^{-1})	Rice-(HV††† per 1yr)
GIMHAE (N35°20`, E128°46`)	7	15	3	NPK†† + livestock	Oil cake (2 ton ha^{-1}) + Livestock	Rice
SANCHEONG-I† (N35°26`, E127°52`)	12	11	10	NPK†† + Oil cake	Oil cake (1.1 ton ha^{-1}) + Livestock	Rice
SANCHEONG-II† (N35°28`, E127°56`)	12	12	6	NPK†† + Oil cake	Oil cake (1.1 ton ha^{-1}) + Livestock	Rice
SUNCHEON (N34°56`, E127°19`)	5	12	8	NPK†† + livestock	Oil cake + Livestock	Rice-(IRG††† per 1yr)

†CON, convention; ORG, organic
††NPK means chemical fertilizer
†††HV means hairy vetch and IRG means italian ryegrass

하여 대상 필지의 농업용수 input-output 지점과 대칭 방향으로 대각선 선상의 3~4개 지점의 토양시료를 채취하여 각각 혼합하였다. 채취한 토양시료는 음건하여 2 ㎜ 토양체 (sieve)에 통과시킨 후 토양 화학성 분석에 사용하였다. 토양화학성 분석은 농촌진흥청 토양분석법을 적용하였다[30]. pH 측정은 토양시료와 3차 증류수의 비율을 1:5로 추출하여 pH 측정기 (Orion Star™ A215 pH meter, Thermo-Scientific, USA)로 측정하는 초자전극법으로 분석하였고, 전탄소 (T-C) 및 전질소 (T-N) 함량은 원소분석기 (Vario MAX CN, Elementar, Germany)를 이용한 건식연속법으로 분석하였다. 치환성 양이온 (K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+})은 1M-NH_4OAc (pH 7.0) 완충용액으로 추출하여 ICP (Integra XL, GBC Scientific Equipment Ltd, Australia)로 분석하였고, 유효인산은 Lancaster법으로 하여 720 nm (UV-2600, Shimadzu, Japan)에서 흡광도를 측정하여 분석하였다.

2.3. 토양탄소 저장량 산정

토양탄소 저장량을 산출하기 위하여 다음과 같은 식을 적용하였다[29),(34]. Equation (1)-(3)은 실제 용적밀도 측정값이 없는 경우 유기물과 무기물의 상수를 적용하여 용적밀도를 예측하게 되며 토양탄소 저장량을 산정할 수 있다.

$$SOCstock = BD \times SOCconc \times D. \quad (1)$$

where: *SOCstock* means the amount of soil carbon storage (MgC ha^{-1})
BD means the soil bulk density (Mg m^{-3})
SOCconc means the content of soil carbon (%)
D means the thickness of the soil layer (m)

$$BD = \frac{100}{(\frac{OMconc}{0.244}) + (\frac{100 - OMconc}{1.64})}. \quad (2)$$

where: 0.244 means the bulk density of soil organic matter
1.64 means the bulk density of soil mineral matter
OMconc means the concentration of soil organic matter (%)

$$OMconc = 1.72 \times SOCconc. \quad (3)$$

2.4. 토양탄소 저장량의 경제적 가치 산정

토양탄소 저장량의 경제적 가치를 산출하기 위하여 다음과 같은 식을 적용하였다[11),(14),(16)].

$$SOCstock,value = SOCstock \times CERprice. \quad (4)$$

where: *SOCstock,value* means the monetary value of soil carbon stock (KRW)
SOCstock means the amount of soil carbon storage (MgC ha^{-1})
CERprice means the price of certificated emission reductions (KRW).

2.5. 통계분석

통계분석은 GraphPad Prism 5 (Version 5.01. GraphPad Software, INC. 2007)을 사용하여 unpaired t test를 수행하였다($p<0.0001$). 모든 분석은 하나의 시료를 최소 세 번 반복하였고, *은 $p < 0.05$, **은 $p < 0.01$, 그리고 ***은 $p < 0.001$을 의미한다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 재배방법에 따른 지역별 농경지 토양의 화학성 비교

3.1.1. 일반화학성

재배방법에 따른 토양의 일반화학성을 알아보기 위하여 지역별 채취한 토양시료를 분석한 결과는 다음과 같다(Table 2). 토양의 일반화학성은 토양시료의 논토양 pH의 경우 지역별 유의한 차이가 나지 않았다(관행: pH 5.5-6.6, 유기: pH5.7-6.2). 또한 산청-I 지역의 관행재배토양(pH6.6)을 제외하고 논토양 pH 적정범위 (pH5.5-6.5)안에 속해 있었다. 유기물 함량(OM)은 부여-I 지역 (관행: 24.6 g kg^{-1}, 유기: 22.9 g kg^{-1})을 제외하고 모든 지역에서 관행토양과 비교하여 유기토양에서 높게 측정되었다(관행: 16.0-32.2 g kg^{-1}, 유기: 22.9-38.7 g kg^{-1})(*P*-value = 0.0019). 부여-II 지역의 관행토양을 제외하고 논토양 유기물 함량 적정범위(20-30 g kg^{-1})에 포함되어 있었고, 순천 지역의 경우 적정범위 보다 높은 유기물 함량(관행: 32.2 g kg^{-1}, 유기: 38.7 g kg^{-1})이 나타났다. 전질소

Table 2. Chemical Properties of Paddy Soil by Conventional and Organic Cultivation

Region	Type of cultivation	pH	EC	OM	TN	Av. P_2O_5 †	Ex. Cation †		
							K	Ca	Mg
		1:5	dS m^{-1}	g kg^{-1}		mg kg^{-1}	cmol$^+$ kg^{-1}		
BUYEO-I	CON	5.5	0.4	24.6	1.4	76.9	0.3	3.1	0.7
	ORG	5.7	0.5	22.9	1.9	56.3	0.2	3.3	0.7
BUYEO-II	CON	6.4	0.3	16.0	1.0	113.9	0.3	3.0	0.8
	ORG	6.2	0.5	30.1	0.8	99.1	0.3	5.0	1.2
GIMHAE	CON	5.8	0.9	26.7	1.1	87.3	0.3	7.9	2.8
	ORG	6.2	1.0	29.5	2.0	86.1	0.6	9.1	2.8
SANCHEONG-I ††	CON	6.6	0.4	21.9	1.3	64.1	0.1	8.6	1.5
	ORG	6.1	0.7	25.2	1.4	86.5	0.3	8.3	2.1
SANCHEONG-II ††	CON	6.6	0.4	21.9	1.3	64.1	0.1	8.6	1.5
	ORG	5.9	0.3	27.1	1.0	114.9	0.1	5.2	1.1
SUNCHEON	CON	5.9	0.4	32.2	1.1	88.2	0.2	4.6	0.6
	ORG	5.8	0.5	38.7	2.0	97.9	0.2	5.3	0.8
Optimal range †††		5.5 -6.5	-	25 -30	-	80 -120	0.2 -0.3	5.0 -6.0	1.5 -2.0

†Av., available; Ex., exchangeable.
††The data of conventional paddy soil is same in Sancheong-I and Sancheong-II.
†††Status and Changes in Chemical Properties of Paddy Soil in Korea (RDA, 2012).

(TN) 함량은 부여-I (관행: 1.4 g kg^{-1}, 유기: 1.9 g kg^{-1}), 김해 (관행: 1.1 g kg^{-1}, 유기: 2.0 g kg^{-1}), 산청-I (관행: 1.3 g kg^{-1}, 유기: 1.4 g kg^{-1}), 그리고 순천 (관행: 1.1 g kg^{-1}, 유기: 2.0 g kg^{-1}) 지역의 유기토양이 관행토양보다 높은 질소함량이 나타났다. 토양의 전질소 함량은 토양미생물 활성을 나타내는 중요한 인자이며, 일반적으로 전질소 함량이 높은 경우 미생물 활성이 활발하다고 알려져 있으나[41] 본 연구는 조사하지 않았다. 유효인산의 경우 지역별 관행토양과 유기토양 사이에 뚜렷한 차이가 나타나지 않았다 (관행: 64.1-113.9 ㎎ kg^{-1}). 부여-I 지역의 관행・유기토양과 산청-I, II 지역의 관행토양을 제외하고 논토양 유효인산 적정범위(90-120 ㎎ kg^{-1})에 속해 있었다. 치환성 양이온의 경우 논토양의 적정범위는 0.2-0.3 $cmol^{+}$ kg^{-1}(칼륨), 5.0-6.0 $cmol^{+}$ kg^{-1}(칼슘), 1.5-2.0 $cmol^{+}$ kg^{-1}(마그네슘)이었다. 칼륨의 경우 김해 지역의 유기토양, 산청-I 지역의 관행토양, 그리고 산청-II 지역의 관행・유기토양을 제외하고 적정범위에 포함되었다. 칼슘은 다른 화학성 인자에 비해서 측정값의 변동이 나타났고, 부여-II, 산청-II, 그리고 순천지역의 유기토양을 제외하고 모든 지역 토양의 칼슘 농도는 적정범위 밖에 속해 있었다. 마그네슘은 산청-I, II 지역을 제외하고 모든 지역 토양에서 적정범위보다 낮거나 높게 측정되었다.

3.1.2. 전탄소 함량 비교

토양탄소 저장량 평가를 위한 지역별 논토양의 전탄소 함량은 부여-I 과 김해 지역은 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않았다(Table 3). 부여-I 지역 토양의 전탄소 (TC) 함량은 관행토양은 14.2 g kg^{-1} 로 나타나 유기토양의 13.3 g kg^{-1} 보다 높게 나타났지만 통계적으로 유의한 차이는 없었다. 그러나 부여-II 지역의 관행토양은 9.3 g kg^{-1} 로 유기토양의 17.4 g kg^{-1} 보다 낮은 것으로 조사되었으며, 김해 (관행: 15.5 g kg^{-1}, 유기: 17.1 g kg^{-1}), 산청-I (관행: 12.7 g kg^{-1}, 유기: 14.6 g kg^{-1}), 산청-II (관행: 12.7 g kg^{-1}, 유기: 15.7 g kg^{-1}), 순천 (관행: 18.1 g kg^{-1}, 유기: 22.4 g kg^{-1}) 지역의 전탄소 함량도 유기토양에서 더 높은 탄소함량이 나타났다. 탄소함량은 유기물 함량과 밀접한 관계가 있는데 유기물 자재를 사용한 토양은 토양 입단화가 향상되어 토양탄소의 함량이 증가한다[35),(38)]. 조사 대상 유기재배 논토양의 50%가 월동기간 동안 재배한 풋거름 작물을 토양에 환원하므로 유기물 함량이 높게 나타난 원인으로 사료된다. 또한 유기재배의 경우 화학비료 대신 퇴비나 유박 등 유기질 비료의 투입량이 많기 때문에 유기물 함량이 많아져 토양탄소 함량도 높게 나타난 것으로 판단된다.

3.2. 유기 벼 재배지의 토양탄소 저장량 분석

3.2.1. 지역별 토양탄소 저장량 평가

지역별 유기와 관행 벼 재배에 따른 토양탄소 저장량 산정을 위해 재료 및 방법에서 언급한 equation (1-3)을 적용하여 토양탄소 저장량을 산정하였다 (Fig. 1). 단위 부피 당 토양무게인 용적밀도와 토양 깊이를 적용하여 지역별 유기 및 관행 벼 재배지의 토양탄소 저장량을 산출한 결과 15 ㎝ 유기 벼 재배 논토양은 지역에 따라 28.7 MgC ha^{-1}에서 44.9 MgC ha^{-1}의 토양탄소를 저장하였다. 반면에 관행 벼 재배 논토양은 지역에 따라 19.4 MgC ha^{-1}에서 39.5 MgC ha^{-1}의 토양탄소를 저장하였다. 조사대상 지역 중 부여-I 지역의 경우에만 토양탄소 저장량이 유기토양 (28.7 MgC ha^{-1})보다 관행토양 (30.8 MgC ha^{-1})에서

Table 3. Contents of Total Carbon (TC) in Buyeo, Suncheon, Gimhae, and Sancheong, South Korea

Type of cultivation	TC (g kg^{-1})					
	BUYEO-I	BUYEO-II	GIMHAE	SANCHEONG-I	SANCHEONG-II[†]	SUNCHEON
Convention	14.2	9.3	15.5	12.7[†]	12.7[†]	18.7
Organic	13.3	17.4	17.1	14.6	15.7	22.4
t-test[††]	ns	***	ns	*	*	***

[†]The data of conventional paddy soil is same in Sancheong-I and Sancheong-II
[††]ns means not significant, * means $p < 0.05$, and *** means $p < 0.001$.

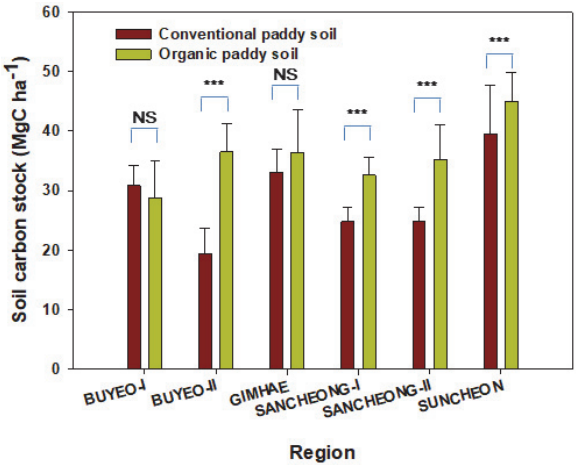

Fig. 1. Comparison of soil carbon storage in buyeo, suncheon, gimhae, and sancheong, south korea. Dark red bar indicate conventional paddy soil and yellow green bar indicate organic paddy soil. NS and symbol with above data from each region indicate significant difference. NS meanse significant difference and *** means $p < 0.001$.

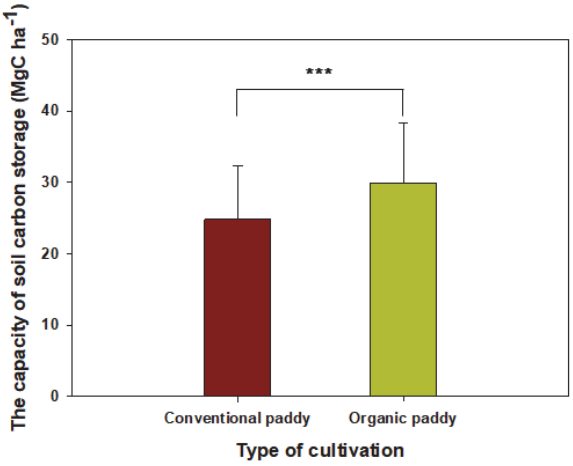

Fig. 2. Comparison of soil carbon storage between conventional and organic cultivation. The symbol with above data indicate significant difference. *** means $p < 0.001$.

높게 나타났는데 이 지역의 경우 관행 재배에도 불구하고 유박 사용량이 유기 재배와 비슷한 양(4 ton ha^{-1})을 사용하였기 때문에 토양 유기물 함량이 높게 유지된 것으로 판단된다(Table 1). 다른 지역의 경우 부여-II (관행: 19.4 MgC ha^{-1}, 유기: 36.5 MgC ha^{-1}), 김해 (관행: 33.0 MgC ha^{-1}, 유기: 36.4 MgC ha^{-1}), 산청-I (관행: 24.8 MgC ha^{-1}, 유기: 32.6 MgC ha^{-1}), 산청-II (관행: 24.8 MgC ha^{-1}, 유기: 35.1 MgC ha^{-1}), 그리고 순천 (관행: 39.5 MgC ha^{-1}, 유기: 44.9 MgC ha^{-1})에서 관행토양보다 유기토양의 탄소저장량이 높았다. 지역에 따라 토성의 차이, 재배기술 및 농자재 사용량의 차이에 의해 토양탄소 저장량은 다르게 나타났지만, 같은 지역의 유기토양과 관행토양의 탄소저장량을 비교를 하면 유기토양이 관행토양보다 많은 탄소를 저장하는 것으로 조사되었다. 향후 유기와 관행 재배에 따른 토양탄소 저장량 분석의 신뢰도를 향상시키기 위해서 다른 지역 논토양의 토양탄소 저장량 분석도 필요하다고 판단된다.

3.2.2. 재배방식별 토양탄소 저장량 평가

유기재배와 관행재배에 따른 벼 재배 논토양의 탄소저장량은 다음과 같이 평가되었다. 유기 벼 재배 논토양의 탄소저장량은 관행 벼 재배 토양에 비하여 약 6.7 MgC ha^{-1} 가 높게 평가되었으며, 통계적으로 유의한 차이가 나타났다(Fig. 2). Gattinger et al. (2012)는 14년 이상 유기 재배를 지속한 토양의 경우 관행 재배 토양에 비하여 20 ㎝ 깊이에 저장되는 토양탄소가 3.50±1.08 MgC ha^{-1} 가량 증가한다고 보고하였다[4]. 토양에 투입되는 유기물의 종류에 따라 토양탄소 함량 비율은 달라지며, 풋거름이나 볏짚 등의 식물잔재 형태보다 가축분퇴비의 사용이 토양탄소 축적에 더 연관이 있다[37], 본 연구의 조사대상 필지는 모두 가축분퇴비를 사용하며, 경우에 따라 볏짚 및 풋거름 작물을 환원하는 재배방식을 따르고 있다.

3.3. 유기농 실천에 따른 토양탄소 저장량의 경제적 가치 평가

유기와 관행 벼 재배에 따른 논토양의 탄소저장량의 경제적 가치를 평가하기 위하여 equation (4)를 이용하여 산출하였다. 배출권 거래가격은 2017년 인증실적(KOC)의 평균가격인 1 ton 당 21,000원을 기준으로 적용하였다. 단위면적 당 토양탄소 저장량을 화폐적 가치로 산출한 결과 유기 논토양은 1 ha 당 36.1 MgC의 탄소를 저장하여 758,100원의 화폐적 가치가 산출되었고, 관행 논토양은 1 ha 당 29.4 MgC의 탄소를 저장하여 617,400원의 화폐적 가치가 나타났

Table 4. Economic Evaluation of Soil Carbon Storage in the Organic and the Conventional Paddy Soil

Type of cultivation	Unit amount (MgC ha^{-1})	Value (KRW ha^{-1})	Gap of value (KRW ha^{-1})
Organic paddy	36.1	758,100	140,700
Conventional paddy	29.4	617,400	

Table 5. Economic Evaluation of Total Soil Carbon Storage Using a Carbon Trading Price in the Environmentally-Friendly and the Conventional Paddy Soil, South Korea

Type of cultivation	Area (ha)	Unit amount (MgC ha^{-1})	Total amounts (10^3 tons)	Value (million KRW)
Environmentally-friendly paddy	48,381†	36.1	1,746	36,678
Conventional paddy	795,884	29.4	23,399	491,379
Total paddy (sum)	844,265	-	25,145	528,057

†The area include organic and non-pesticide area

는데, 유기 벼 재배를 할 경우 관행 벼 재배보다 1 ha 당 6.7 MgC의 토양탄소를 더 저장하며 140,700원의 경제적 가치가 있는 것으로 산출되었다(Table 4). 토양의 탄소저장 또는 탄소격리에 관한 많은 연구가 수행되고 있으나 재배방식에 따른 토양탄소 저장능력 평가 시도는 많지 않은 상황에서 본 연구는 큰 의의가 있다고 판단된다. 토양 훼손과 많은 토양탄소 유실은 대기 중 탄소배출량을 증가시키므로 지속가능한 토양관리방법이 요구된다[10]. 토양탄소 저장능력은 바이오차의 사용[39], 유기물 환원[1]등으로 향상시킬 수 있으며, 향후 벼 재배 이외의 다른 유기재배 작물별 토양탄소 저장량 및 경제적 가치를 추정하는 연구가 필요하다고 판단된다.

유기와 관행 벼 재배에 따른 논토양의 탄소저장량을 우리나라 전체 논토양 면적에 적용하여 재배방식에 따른 벼 재배 토양탄소 저장량의 경제적 가치를 산출하였다. 우리나라 전체 논토양 면적은 844,265 ha (KOSIS, 2019)이며, 친환경 벼 재배 면적은 48,381 ha (NAQS, 2019)으로 전체 논토양 면적의 5.7 %를 차지하고 있다. 전체 경작 면적을 바탕으로 토양탄소 저장량의 경제적 가치를 추정한 결과 친환경 벼 재배 논토양은 174.6만 톤의 탄소저장과 367억 원의 가치가 있으며, 관행 벼 재배 논토양은 2,400만 톤의 탄소저장과 4,914억 원의 가치가 있는 것으로 산출되어 우리나라 전체 논토양은 2,514만 톤의 탄소를 저장하고 있으며 5,280억 원의 화폐적 가치를 나타났다(Table 5). 유기농을 포함한 친환경 벼 재배 면적을 확대한다면 현재 논토양의 토양탄소 저장량 및 경제적 가치를 향상시키는 좋은 대안으로 판단된다. 최근 국제적인 기후변화에 대한 관심이 높아지면서 토양탄소의 저장기능은 주요 평가지표로 간주되고 있다. Kim et al. (2017)는 탄소 배출권을 1톤 당 $40 의 가격으로 적용하여 단위 면적당 토양탄소 저장량(69.9 MgC ha^{-1})을 산정하여, 토지이용별 탄소저장량의 경제적 가치를 산림은 11조 9600억 원, 논은 3조 7000억 원, 밭은 2조 2000억 원으로 산정하였다.

4. 결 론

본 연구는 유기와 관행재배에 따른 논토양의 탄소저장량을 분석하여 유기토양의 탄소저장능력을 관행토양과 비교하고, 그 결과를 기초로 기후변화에 대응하는 국가 탄소배출권 거래시장을 대비한 토양탄소 저장량의 객관적인 비교를 위하여 화폐적 가치로 평가하고자 수행하였다. 조사된 6개 지역 중 부여-I 지역을 제외한 모든 지역에서 관행에 비하여 유기 토양의 탄소함량이 높게 나타났으며, 예측된 토양탄소 저장량을 비교한 결과 탄소함량의 결과와 마찬가지로 유기토양의 탄소저장량이 관행토양보다 약 23 % 높게 확인되었다. 또한, 논토양 탄소저장량

에 대한 경제적 가치를 비교한 결과 단위면적(ha) 당 유기토양의 탄소저장량과 이에 대한 화폐적 가치는 36.1 MgC와 758,100원이고 관행토양은 29.4 MgC와 617,400원으로 추정되므로 유기농을 실천할 경우 1 ha 당 6.7 MgC의 탄소저장과 147,000원의 경제적 효과를 가져 올 수 있을 것이며, 유기농 실천에 따른 유기 벼 재배는 토양탄소 저장을 통한 토양비옥도 증진뿐만 아니라 온실가스 배출을 저감하는데 효과적이라 사료된다. 또한 유기와 관행 토양의 탄소저장량에 대한 화폐적 가치 산정은 향후 탄소배출권 거래시장 또는 공익형 직불제가 도입될 경우 농업분야 탄소배출량의 객관적인 평가 자료 및 유기농업의 공익적 가치를 평가하는 근거자료로 활용가능하다고 판단된다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업 연구과제(Project No. PJ0126842019)로 수행되었습니다.

References

1. Bhattacharyya, P., Roy, K. S., Neogi, S., Adhya, T. K., Rao, K. S. and Manna, M. C., “Effects of rice straw and nitrogen fertilization on greenhouse gas emissions and carbon storage in tropical flooded soil planted with rice”, Soil & Tillage Research, 124, pp. 119~130. (2012).
2. Cho, H. S., Seo, M. C., Kim, J. H., Sang, W. G., Shin, P. and Baek, J. K., “The Changes of Soil Carbon as Affected by Several Kinds of Organic Material in Upland Soil”, Korean J. Soil Sci. Fert., 51(4), pp. 586~595. (2018).
3. Dai, X., Zhou, W., Liu, G., Liang, G., He, P. and Liu, Z., “Soil C/N and pH together as a comprehensive indicator for evaluating the effects of organic substitution management in subtropical paddy fields after application of high-quality amendments”, Geoderma, 337, pp. 1116~1125. (2019).
4. Food and Agriculture Organization (FAO), “Organic agriculture and climate change mitigation: A report of the Round Table on Organic Agriculture and Climate Change”, Rome, Italy. (2011).
5. Gattinger, A., Muller, A., Haeni, M., Skinner, C., Fliessbach, A., Buchmann, N., Mader, P., Stolze, M., Smith, P., Scialabba Nel, H. and Niggli, U., “Enhanced top soil carbon stocks under organic farming”, PNAS, 109(44), pp. 18226~18231. (2012).
6. Hong, C. O., Kang, J. S., Shin, H. M., Cho, J. H. and Suh, J. M., “Effect of Compost and Tillage on Soil Carbon Sequestration and Stability in Paddy Soil”, Journal of Environmental Science International., 22(11), pp. 1509~1517. (2013).
7. Hong, S. Y., Zang, T. S., Kim, M. S., Che, E. Y. and Ha, S. K., “A study on estimation soil carbon in Asian countries and Korea”, Proceeding from autumn symposium at Korean Soc. Soil Sci. Fert. pp. 148~149. (2010).
8. Hwang, W. J., Park, M. S., Kim, Y. S., Cho, K. J,. Lee, W. K. and Hyun, S. G., “Analysis of Greenhouse Gas Emission Models and Evaluation of Their Application on Agricultural Lands in Korea”, Ecology and Resilient Infrastructure, 2(2), pp. 185~190. (2015).
9. Jeon, W. T., Hur, S. O., Seong, K. Y., Oh, I. S., Kim, M. T. and Kang, U. G., “Effect of Green Manure Hairy vetch on Rice Growth and Saving of Irrigation Water”, Korean J. Soil Sci. Fert., 44(2), pp. 181~186. (2011).
10. Jeong, G. Y., “Spatial Prediction and Economic Evaluation of Soil Carbon Stocks Using Digital Soil Mapping in an Agricultural Landscape”, The Geographical Journal of Korea, 52(3), pp. 389~401. (2018).
11. Jeong, H. C., Kim, G. Y. Lee, S. B. Lee, J. S. Lee, J. H. and So, K. H. “Evaluation of greenhouse gas emissions in cropland sector on local government

levels based on 2006 IPCC guideline", Korean J. Soil Sci. Fert., 45(5), pp. 842~847. (2012).
12. Kang, H. W., Kim, M. T., Kim, K. S., Jeon, W. T., Ryu, J. H. and Seong, K. Y., "No-till Farming System: Research Direction and Outlook in Korea", Korean J. Soil Sci. Fert., 46(3), pp. 143~152. (2013).
13. Kim, M. S., Kim, Y. H., Kang, S. S., Yun, H. B. and Hyun, B. K., "Long-term Application Effects of Fertilizers and Amendments on Changes of Soil Organic Carbon in Paddy Soil", Korean J. Soil Sci. Fert., 45(6), pp. 1108~1113. (2012).
14. Kim, S. C., Hong, Y. K., Lee, S. P., Oh, S. M., Lim, K. J. and Yang, J. E., "Evaluating Feasibility of Soil Quality Assessment According to Soil Carbon Contents", Korean J. Soil Sci. Fert., 50(1), pp. 65~70. (2017).
15. Kim, S. J., Choi, J. S., Kang, S. G., Park, J. H., Hong, S. H., Kim, T. S. and Yang, W. H., "Effects of Tillage and Cultivation Methods on Carbon Accumulation and Formation of Water-stable Aggregates at Different Soil Layer in Rice Paddy", Korean J. Soil Sci. Fert., 50, pp. 634~643. (2017).
16. KOSIS, Agricultural Area Survey, Korean Statistical information Service. (2019).
17. Kundu, S., Ranjan, B., Ved P., Ghosh, H. B. and Gupta, H. S., "Carbon sequestration and relationship between carbon additionand storage under rainfed soybean-wheat rotation in a sandy loam soil of the Indian Himalay", Soil & Tillage Research, 92, pp. 87~95. (2007).
18. Lal, R., Kimble, J. M. and Follet, R., "Land use and soil carbon pools in terrestrial ecosystems, in: Lal, R., Kimble, J. M., Follet, R. (Eds.), Management of Carbon Sequestration in Soils", CRC Press, New York, USA. (1997).
19. Lal, R., "Erosion effects on agronomic productivity, in: Laflen, J. M., Tian, J., Huang., C. H. (Eds.), Soil Erosion and Dryland Farming", CRC Press, Boca Raton, FL, USA, pp. 229~246. (2000).
20. Lee, D. B., Jung, S. C., So, K. H., Jeong, J. W., Jung, H. C., Kim, G. Y. and Shim, G. M., "Evaluation of Mitigation Technologies and Footprint of Carbon in Unhulled Rice Production", Climate Change Research, 3(2), pp. 129~142. (2012).
21. Lee, N. Y., "Estimation of Carbon Storage in Three Cool-Temperate Broad-Leaved Deciduous Forests at Bukhansan National Park, Korea". Journal of National Park Research, 2(2), pp. 53-57. (2011).
22. Leifeld, J. and Fuhrer, J., "Organic Farming and Soil Carbon Sequestration: What Do We Really Know About the Benefits?", AMBIO, 39, pp. 585~599. (2010).
23. Le Quéré, C., Moriarty, R., Andrew, R. M., Peters, G. P., Ciais, P., Friedlingstein, P., Jones, S. D., Sitch, S., Tans, P., Arneth, A., Boden, T. A., Bopp, L., Bozec, Y., Canadell, J. G., Chini, L. P., Chevallier, F., Cosca, C. E., Harris, I., Hoppema, M., Houghton, R. A., House, J. I., Jain, A. K., Johannessen, T., Kato, E., Keeling, R. F., Kitidis, V., Klein Goldewijk, K., Koven, C., Landa, C. S., Landschützer, P., Lenton, A., Lima, I. D., Marland, G., Mathis, J. T., Metzl, N., Nojiri, Y., Olsen, A., Ono, T., Peng, S., Peters, W., Pfeil, B., Poulter, B., Raupach, M. R., Regnier, P., Rödenbeck, C., Saito, S., Salisbury, J. E., Schuster, U., Schwinger, J., Séférian, R., Segschneider, J., Steinhoff, T., Stocker, B. D., Sutton, A. J., Takahashi, T., Tilbrook, B., van der Werf, G. R., Viovy, N., Wang, Y.-P., Wanninkhof, R., Wiltshire, A., and Zeng, N., "Global carbon budget 2014", Earth Syst. Sci. Data Discuss 7, pp. 47~85. (2015).
24. Li, C., Mosier, A., Wassmann, R., Cai, Z., Zheng, X., Huang, Y., Tsuruta, H., Boonjawat, J. and Lantin, R., "Modeling greenhouse gas emissions from rice-based production systems: Sensitivity and upscaling", Global biogeochem. cycles, 18, GB1043. (2004).
25. Lim, J. E., Lee, S. S., Jeong, S. H., Lee, B. M., Lee, Y. H., Choi, Y. B. and Ok, Y. S., "Effects of Green Manure Incorporation Method on Soil Physicochemical Properties", Journal of Agricultural, Life and Environmental Sciences, 24(4), pp. 1~7.

(2012).
26. Minamikawa, K., Sakai, N. and Hayashi, H., “The effects of ammonium sulfate application on methane emission and soil carbon content of a paddy field in Japan”, Agriculture, Ecosystems and Environment, 107, pp. 371~379. (2005).
27. Mohammad, T. K. N., “Storage and drivers of soil organic carbon and nitrogen in a rangeland ecosystem across a lithosequence in western Iran”, Catena, 176, pp. 245~263. (2019).
28. NAQS, “2018 Status certificated organic agricultural products”, National Agricultural Products Quality Management Service. (2019).
29. Nelson, D. W. and Sommer, L. E., “Total carbon, organic carbon, and organic matter”, Methods of Soil Analysis, ed Page AL (American Society of Agronomy, Madison, WI), 2nd Ed, pp. 539~579. (1982).
30. NIAST, “Methods of analysis of soil and plant”, National Institute of Agricultural Science and Technology, Suwon, Korea, (2000).
31. Park, J. N., Lim, J. E., Lee, S. S., Jeong, S. H., Lee, B. M. and Ok, Y. S., “Effects of Tillage and No-till Practices with Green Manure on Soil Carbon”, Journal of Agricultural, Life and Environmental Sciences, 25(3), pp. 39~43. (2013).
32. Park, S. J., Lee, C. H., Kim, M. S., Yun, S. G., Kim, Y. H. and Ko, B. G. “Calculation of GHGs Emission from LULUCF-Cropland Sector in South Korea”, Korean J. Soil Sci. Fert., 49(6), pp. 826~831. (2016).
33. Park, S. J., Lee, C. H. and Kim, M. S., “The Analysis of Greenhouse Gases Emission of Cropland Sector Applying the 2006 IPCC Guideline”, Journal of Climate Change Research, 9(4), 445~452. (2018).
34. Post, W. M. and Kwon, K. C. “Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential”, Global Change Biology, 6, pp. 317~327. (2000).
35. Rasool, R., Kukal, S. S. and Hira, G. S., “Soil organic carbon and physical properties as affected by long-term application of FYM and inorganic fertilizers in maize-wheat system”, Soil and Tillage Research, 101, pp. 31~36. (2008).
36. Schlesinger, W. H., “Carbon sequestration in soils: Some cautions amidst optimism”, Agric. Ecosyst. Environ., 82, pp 121~127. (2000).
37. Seo, M. C., Cho, J. H. S., Kim, H., Sang, W. G., Shin, P. and Lee, G. H., “Evaluating Soil Carbon Changes in Paddy Field based on Different Fraction of Soil Organic Matter”, Korean J. Soil Sci. Fert. 48(6), pp. 736~743. (2015).
38. Six, J., Paustian, K., Elliott, E. T. and Combrick, C., “Soil structure and organic matter. I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon”, Soil Sci. Soc. Am. J., 64, pp. 681~689. (2000).
39. Stewart, C. E., Zheng, J. Y., Botte, J. and Cotufo, M. F., “Co-generated fast pyrolysis biochar mitigates greenhouse gas emissions and increases carbon sequestration in temperate soils”, GCB Bioenergy, 5, pp. 153~164. (2013).
40. Su, Y. Z., Wang, F., Suo, D. R., Zhang, Z. H. and Du, M. W., “Long-term effect of fertilizer and manure application on soil-carbon sequestration and soil fertility under the wheat-wheat-maize cropping system in northwest China”, Nutrient Cycling in Agroecosystems, 75, pp. 285~295. (2006).
41. Yoo, G. Y., Kim, H. J., Kim, Y. S. and Jung, M. H., “Soil Carbon and Microbial Activity Influenced by Pasture andRice Paddy Management”, Korean J. Soil Sci. Fert., 45(3), pp. 435~443. (2012).