

농업환경 보전 프로그램 중 토양탄소 저장 증진 영농활동의 효과 정량화 방법론

현준기* · 김시진** · 정완섭** · 김재옥*** · 유가영****†

*경희대학교 일반대학원 환경응용과학과 박사과정, **경희대학교 일반대학원 환경응용과학과 연구원,

한국농어촌공사 어촌수산처 수산해양부 차장, *경희대학교 환경학 및 환경공학과 교수

Quantifying the Effects of Agricultural Management Practices on Soil Carbon Storage in an Agricultural Environment Conservation Program

Hyun, Junge* · Kim, Si Jin** · Jung, Wan Seop** · Kim, Jae-Ok*** · Yoo, Ga Young****†

*Ph.D Student, Dept. of Applied Environmental Science, Graduate School, Kyung Hee University, Gyeonggi, Korea

**Research Assistant, Dept. of Applied Environmental Science, Graduate School, Kyung Hee University, Gyeonggi, Korea

***Ph.D, Fishing Village & Fisheries Office Fishery & Coastal Development Department, Korea Rural Community Corporation, Jeollanam-do, Korea

****Professor, Dept. of Environmental Science and Engineering, Kyung Hee University, Gyeonggi, Korea

ABSTRACT

Soil carbon storage is considered an important climate change mitigation strategy as it represents a major carbon storage reservoir in the global carbon cycle. Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries (MIFAFF) set up the Agricultural Environment Conservation Program and agricultural practices to promote soil carbon storage are included as important activities. However, there is no established methodology to quantify the performance of agricultural practices that can enhance soil carbon storage. In this study, a methodology and tool were developed to quantify changes in soil carbon storage related to conservation actions. First, cropland was divided into rice paddies, agricultural fields, and perennial/tree crops, and agricultural activities were systematized considering domestic agricultural circumstances. No-till farming, cultivation of green manure, crop residue return, compost application, and biochar input were considered. Next, default factors of IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) guideline and domestic research papers were reviewed to find the relevant effects of different activities on soil carbon storage. Finally, a spreadsheet for calculating changes in soil organic carbon stock was built using Microsoft Excel. The developed method was applied to Sangju-si and Boryeong-si, which joined the Agricultural Environment Conservation program, and the total increase in soil carbon storage in 20 years was calculated as 255.0 ton C and 356.8 ton C, respectively. The methodology and soil carbon stock calculator established in this study will be able to more accurately reflect the domestic situation if country-specific emission factors are incorporated in the future.

Key words: Agricultural Environment Conservation Program, Soil Organic Carbon, Agricultural Practice, Climate Change, Soil Organic Carbon Stock Calculator

1. 서론

2018년 기준 우리나라의 온실가스 총 배출량은 727.6 Mt-CO_{2eq}이며, 그중 농업 부문의 배출량은 21.2 Mt-CO_{2eq}로, 전체의 약 2.9%를 차지하고 있다(Ministry of Environment 2020).

이처럼 농업에서 발생하는 온실가스는 전체 배출량에서 차지하는 비중은 적지만, 비 이산화탄소인 메탄과 아산화질소배출의 기여도가 높게 나타나는 양상을 보인다. 아산화질소는 질산화와 탈질 작용의 부산물로 인한 배출이 주 되고, 메탄은 혐기성 토양과 가축분뇨와 장내발효 등이

†Corresponding author : gayoo@khu.ac.kr (1732, Deogyong-daero, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 17104, Republic of Korea. Tel. +82-31-201-3686)

ORCID 현준기 0000-0003-3433-3383
정완섭 0000-0002-5610-2263
유가영 0000-0002-5465-1584

김시진 0000-0002-8700-2492
김재옥 0000-0001-7165-1829

주된 배출원이다. 세계적으로 온실가스 배출 저감을 위해 다방면으로 노력하는 지금, 농업 부문도 그 예외가 될 수 없고 온실가스 배출 저감을 위해 노력해야 한다. 특히 농업 부문에서의 온실가스 감축은 그 비용이 타 부문 대비 상대적으로 적을 뿐 아니라, 이로 인한 편익이 크기 때문에 온실가스 인벤토리 관리에 있어 중요하다.

IPCC 2019 개정판 국가 온실가스 인벤토리 작성 지침에 따르면 농업 부문은 배출원으로 되어있다. 지금까지는 간과되어온 부분이나, 여기에 토양탄소 저장을 고려한다면 농업 부문도 일부 흡수원이 될 수 있다. 토양탄소 저장은 농업 부문의 대표적 온실가스 감축 활동이며 토양탄소는 농업 생태계의 건강성 지표이기도 하다(Lal 2004; Abbas et al., 2020). 이러한 토양 내 탄소의 저장량은 유기물의 유입과 분해·유출 사이의 균형에 의해 결정되는데, 이를 증가시키기 위해서는 작물의 잔사, 녹비, 퇴비, 바이오차의 투입을 통해 유기물 유입량을 늘리는 한편 보존경운 등을 도입하여 유기물의 유출·분해를 감소시켜야 한다(Lal 2009; Cotrufo et al., 2015; Liu et al., 2016; Chenu et al., 2019; Gross and Glaser 2021; Ma et al., 2021).

농림축산식품부는 제4차 친환경 농업육성 5개년 계획(2016~2020)에서 농업환경개선이 필요한 지역에 개선계획을 수립하고 토양, 용수, 생태 등 농업환경 보전활동을 시행하는 사업인 농업환경보전프로그램 시행체계를 마련하였다(MAFRA 2020a). 동 사업을 통해 온실가스 감축, 농업 환경 보전 등 다양한 성과를 이룰 수 있었으나, 이에 대한 성과관리 체계 및 정량적 평가 방법 확립을 위한 다양한 노력이 필요하다. 특히, 국내에는 농업 부문의 토양탄소 저장과 관련한 자료가 불충분하기 때문에 농업환경보전프로그램 시행에 따른 탄소 저장 증대 효과의 평가 및 관리가 어려운 실정이다. 우리나라의 농업환경 보전 프로그램과 유사한 지원 제도들을 일본, 호주 등에서도 찾아볼 수 있다. 일본은 환경보전형 농업직접지불사업을 통해 보존경운, 녹비작물 재배 등 탄소 저장 증진 영농활동을 수행하는 농가에 대해 인센티브를 지급하고 있다. 각 영농활동의 효과는 프로세스 기반 모델(RothC)을 통해 평가하고 있으며, 이를 농민들도 쉽게 파악할 수 있도록 웹사이트를 제공하고 있다(Shirato 2020). 호주 역시 토양탄소 저장량을 증진시킨 농가에게 인센티브를 지급하는 soil carbon project를 운영하고 있는데, 그 효과에 대한 평가는 프로젝트 시작 전·후의 토양 탄소 저장량을 직접 측정, 비교하여 이루어지고 있다(Australian Government 2020). 따라서, 환경보전형 영농활동에 대한 토양 내 탄소

저장 효과를 정량화 할 수 있는 방법론과 이러한 활동을 체계적으로 평가하는 방법 및 산정식의 마련이 필요하다고 판단되어 연구를 진행하였다.

본 연구를 통해 환경보전형 영농활동의 토양 내 탄소 저장 효과를 체계적으로 평가하는 방법론을 제안하고자 한다. 현행 농업환경 보전 프로그램 사업 활동별 효과를 분석하기 위해 우선, 토양탄소 저장 증진 효과가 있는 영농활동들을 조사하여 유형화하였다. 이후, 영농활동별 토양탄소 저장 증진 효과를 평가한 국내외 자료를 수집하여 산정 방법론과 도구를 설계한 뒤 현행 농업활동의 효과를 정량화 하기로 하였다. 최종적으로 도출된 방법론을 통해 상주시와 보령시를 대상으로 한 사례 연구를 수행하였는데, 두 지역에 농업환경 보전 프로그램을 도입함에 따라 증가할 토양탄소 저장량을 산정하였다.

2. 연구방법

2.1. 국내 토양탄소 저장량 증대 영농활동 분석

현재 국내 농업 부문 온실가스 배출 감축 및 토양탄소 저장 증진에 관련된 제도로 농업환경 보전 프로그램(농림축산식품부), 저탄소 농축산물 인증제(농업기술실용화재단), 농업·농촌 자발적 온실가스 감축사업(농업기술실용화재단), 공익형 직접직불제(농림축산식품부)의 4개가 운영 중임을 확인할 수 있었다(FACT 2019; Lee GJ 2019; MAFRA 2020a; MAFRA 2020b). 각 제도에서 지정한 토양탄소 저장 증진 잠재력이 있는 영농활동은 표 1과 같다.

IPCC를 비롯한 선행연구에서 제안하는 토양탄소 저장 증진 영농활동으로는 무경운·부분경운 도입, 녹비작물(피복작물) 재배, 작물잔사 환원, 퇴비 적정 수준 투입, 바이오차 투입이 있다(Chenu et al., 2019; IPCC 2019a; Amelung et al., 2020; Sun et al., 2020). 이를 국내에서 시행 중인 4개 제도와 비교해본 결과, 공익직불제의 경우 퇴비 투입 이외의 영농활동을 고려하고 있지 않았고, 저탄소 농축산물 인증제 역시 무경운과 보존경운만을 고려하고 있었다. 농업·농촌 자발적 온실가스 감축사업 역시 보존경운과 바이오차 투입만을 토양탄소 저장 증진 영농활동으로 인정하고 있었다. 반면 농업환경 보전 프로그램은 바이오차 이외의 영농활동들을 모두 포함하고 있어 농민들이 토양탄소 저장 증진을 효과적으로 수행할 수 있는 제도적 근거를 제공하고 있었다.

Table 1. Agricultural activities with the potential to increase soil carbon storage by projects related to greenhouse gas emission reduction in the domestic agricultural sector

Projects	Agricultural activities
Agricultural environment conservation program	<ul style="list-style-type: none"> • Compliance with the standards for using compost and liquid manure • Crop residue retention • Cultivation of fallow green manure crops and soil return • Cover crop residues on the sloped field • Minimize tillage (No-tillage or conservation tillage)
Low-carbon agricultural and livestock products certification agent	<ul style="list-style-type: none"> • No-tillage and conservation tillage
Agricultural/Rural voluntary greenhouse gas reduction project	<ul style="list-style-type: none"> • Conservation tillage • Biochar application
Direct payment system for public interest	<ul style="list-style-type: none"> • Livestock manure composting and compliance with manure spreading standards

2.2. IPCC 국가 온실가스 인벤토리 작성 지침의 토양탄소 부문 산정법 검토

농업환경 보전 프로그램에서 인정하고 있는 영농활동들의 토양탄소 저장 증진 효과를 정량적으로 평가하기 위해 가장 보편적으로 활용되고 있는 IPCC 가이드라인의 산정식을 활용하였다. 식 (1)은 농경지에서 무기질 토양의 탄소 축적변화량을 산정하기 위한 식으로 두 시점의 토양탄소 저장량 차이를 통해 연간 증가량을 산정하는 식이다 (IPCC 2019a; Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea 2021).

$$\Delta C_{\text{Mineral}} = (\text{SOC}_0 - \text{SOC}_{(0-T)}) \cdot A / T \quad (1)$$

$\Delta C_{\text{Mineral}}$: 무기질 토양에서의 연간 탄소 축적변화(ton C/year)
 SOC_0 : 인벤토리 대상연도의 토양 유기탄소 축적(ton C/ha)
 $\text{SOC}_{(0-T)}$: 인벤토리 대상기간의 토양 유기탄소 축적(ton C/ha)
 A : 구획 별 토지 면적(ha)
 T : 인벤토리 대상기간(년)

한 시점의 토양탄소 저장량은 IPCC Tier1 방법에 따라 식 (2)와 같이 계산한다(Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea 2021). 기후대 별 토양탄소 저장 기본계수인 SOC_{REF} 에 토지 이용, 관리 체계(경운 수준), 유기물 시용에 따른 축적계수를 곱하여 산정한다.

$$\text{SOC} = \sum (\text{SOC}_{\text{REF}} \cdot F_{\text{LU}} \cdot F_{\text{MG}} \cdot F_{\text{I}} \cdot A) \quad (2)$$

SOC_{REF} : 기본 토양유기탄소 축적계수(ton C/ha)

F_{LU} : 토지이용 또는 토지이용 변화 형태에 따른 축적 변화계수

F_{MG} : 관리 체계에 따른 축적변화계수

F_{I} : 유기물 시용에 따른 축적변화계수

다음 Table 2는 IPCC에서 제시하고 있는 식 (2)의 세가지 토양탄소 축적 변화계수 중 우리나라의 기후대에 해당하는 값이다.

바이오차 투입에 따른 토양탄소 저장 증가량을 산정하는 방법론은 IPCC 가이드라인에서 처음으로 소개되었다 (IPCC 2019b). 바이오차 투입에 따른 토양탄소 저장 증가량은 식 (3)에 따라 산정할 수 있으며, 이 때 바이오차 내 유기탄소 함량(F_{Cp})은 원료의 종류와 열분해 방법에 의해 결정되고, 토양 투입 후 100년 이상 보존되는 바이오차 탄소의 비율(F_{permp})은 열분해 온도에 의해 결정된다 (Table 3, Table 4). 바이오차의 원료, 열분해 방법, 열분해 온도가 같은 바이오차는 동일한 생산 타입(production type, p)으로 분류될 수 있다.

$$\Delta \text{BC}_{\text{Mineral}} = \sum (\text{BC}_{\text{TOTp}} \cdot F_{\text{Cp}} \cdot F_{\text{permp}}) \quad (3)$$

$\Delta \text{BC}_{\text{Mineral}}$: 바이오차 투입에 따른 총 토양탄소 저장 증가량(t C)
 BC_{TOTp} : 바이오차 생산 타입 p의 토양 투입량 (t biochar)
 F_{Cp} : 바이오차 생산 타입 p의 유기탄소 함량 (t C/ t biochar)
 F_{permp} : 바이오차 생산 타입 p의 토양 투입 100년 후 잔존율 (t 잔존C/ t C)

Table 2. Relative carbon stock change factors (F_{LU} , F_{MG} , and F_I) (over 20 years) for management activities on cropland (IPCC 2019a)

Factor value type	Level	Temperature regime	Moisture regime	IPCC defaults
Land use (F_{LU})	Long-term cultivated	Warm Temperate	Dry	0.76
			Moist	0.69
	Paddy rice	All	Dry and Moist/Wet	1.35
Tillage (F_{MG})	Reduced	Warm Temperate	Dry	0.99
			Moist	1.05
	No-till	Warm Temperate	Dry	1.04
Input (F_I)	Low	Temperate/Boreal	Moist	1.10
			Moist/Wet	0.95
	Medium	All	Dry	0.92
			Moist/Wet	0.92
	High without manure	Temperate/Boreal and Tropical	Dry	1.00
			Moist/Wet	1.04
			Dry	1.11
High with manure	Temperate/Boreal and Tropical	Dry	1.37	
		Moist/Wet	1.44	

Table 3. Values for organic C content factor of biochar by production type (F_{Cp})

Pyrolysis Production Process	Feedstock	Values for F_{Cp}
Pyrolysis	Animal manure	0.38 ± 49%
	Wood	0.77 ± 42%
	Herbaceous (grasses, forbs, leaves)	0.65 ± 45%
	Rice husks and rice straw	0.49 ± 41%
	Nut shells, pits, and stones	0.74 ± 39%
	Biosolids (paper sludge, sewage sludge)	0.35 ± 40%
Gasification	Animal manure	0.09 ± 53%
	Wood	0.52 ± 52%
	Herbaceous	0.28 ± 50%
	Rice husks and rice straw	0.13 ± 50%
	Nut shells, pits, and stones	0.40 ± 52%
	Biosolids (paper sludge, sewage sludge)	0.07 ± 50%

Source: IPCC 2019 refinement volume 4 AFOLU Appendix 4

Table 4. Values for F_{permp} (Fraction of biochar C remaining after 100 years)

Production	Value for F_{permp}
High temperature pyrolysis and gasification (> 600°C)	0.89 ± 13%
Medium temperature pyrolysis (450 ~ 600°C)	0.80 ± 11%
Low (350 ~ 450°C)	0.65 ± 15%

Source: IPCC 2019 refinement volume 4 AFOLU Appendix 4

2.3. 국내 실정을 고려한 토양탄소 축적변화계수의 타당성 검토 및 영농활동 체계 정립

IPCC 가이드라인에 제시된 산정식은 농업환경 보전 프로그램의 토양탄소 저장 증진 영농활동이 모두 반영되어 있기 때문에 이의 효과를 정량적으로 평가하기 위한 방법으로 적합하다고 사료된다. 하지만 산정식에 활용된 계수가 우리나라의 실정에 맞는지 국내 연구 사례를 통한 검증이 필요하다고 판단되어 문헌 조사를 수행하였다. 따라서 각 영농활동(경운, 녹비작물 재배 등) 별로 토양탄소

저장 증진 효과를 보고한 국내 연구사례(보고서 및 문헌)를 조사하여 IPCC Tier 1 기본값과 비교하고 그 타당성을 검토하였다.

또한 일반적으로 현장에서는 각 영농활동이 단독으로 수행되는 것이 아닌 두 개 이상이 결합되어 시행되는 경우가 많기 때문에 산정 방법론을 설계함에 있어 국내 실정에 맞는 영농활동들을 위계를 두어 체계화할 필요성이 있다. 이를 위해 농업환경 보전프로그램의 영농활동을 기준으로 순서도를 작성하여 각 농경지에서 이루어지는 영농활동에 따라 토양탄소 축적 변화계수를 선택할 수 있는 체계를 마련하였다.

2.4. 농경지 토양 유기탄소 저장량 산정을 위한 스프레드 시트 구축 및 사례연구

토양탄소 저장 변화 산정식 및 축적변화계수 검토 결과와 국내 실정에 맞게 체계화된 영농활동 순서도를 바탕으로 농업환경 보전 프로그램 수행 농가의 토양탄소 저장량 변화를 산정할 수 있는 도구를 Microsoft Excel® 프로그램을 기반으로 구축하였다. 농경지 토양 유기탄소 저장량 계산기는 농지의 토성(HAC, LAC, 사질토, 화산회토)과 면적, 현행 영농활동을 입력하였을 때 현 시점의 30cm 깊이의 토양탄소 저장량을 사용자에게 표출할 수 있도록 설계하였다. 이에 더하여 사용자가 토양탄소 저장량 증진을 목적으로 새롭게 수행할 영농활동을 선택하면 토양탄소 저장증가량이 산정될 수 있도록 계산기를 구축하였다(IPCC 산정식에 따라 20년 뒤의 증가량이 도출된다). 바이오차 투입의 경우 현재 농업환경보전프로그램에서 고려하고 있지 않지만, 최근 각광받고 있는 토양탄소 저장 증진 기술임을 고려하였을 때 향후 추가될 수 있다고 판단된다. 따라서 바이오차의 투입에 의한 토양탄소 저장 증가량 역시 바이오차 투입량, 바이오차 원료물질 및 열분해 방법과 열분해 온도의 입력을 통해 산정할 수 있도록 하였다.

구축된 계산기를 사용하여 상주시 아천 1리, 아천 2리, 양범 3리와 보령시 장현 1리의 농업환경 보전 프로그램에 참여하고 있는 농지를 대상으로 사례연구를 수행하였다. 대상지 중 토양탄소 저장 증진을 위한 영농활동(보존경운, 녹비 투입, 작물잔사 환원)이 이루어지는 농지의 면적을 시별로 계산하여 토양탄소 저장 증가량을 산정하였다. 상주시와 보령시의 영농활동 별 농지 면적 자료는 농림축산식품부를 통해 제공받았다.

3. 결과

3.1. 토양탄소 축적 변화계수의 타당성 검토 및 영농활동의 체계화

IPCC (2019)에서는 토지이용을 과수(영년생), 논, 밭으로 구분하고 있다. 다만, 이 방법에서는 논외 토양탄소 축적변화계수를 1.35라는 높은 수치로 보고, 토양탄소 저장 증진을 가져올 수 있는 영농활동은 추가로 고려하지 않았다. 따라서 논에 적용되는 다양한 영농활동의 탄소 저장 효과가 반영되지 않는다는 한계가 있다. 이는 논농사 비중이 52.5%로 큰(Statistic Korea 2020) 국내 실정에 맞지 않으므로 본 연구에서는 경운과 유기물 투입에 따른 논 토양의 탄소 저장을 구체적으로 산정해야 한다고 판단하였고, 논 토양에 대하여 세부적인 산정 방법론과 순서도를 수립하였다. 논에 대한 토양탄소 축적 변화계수(F_{LU})의 경우 보고된 국내 고유 값이 없기 때문에 지리적으로 인접해 있고 유사한 기후대를 가지는 중국 동부 지역의 사례를 참고하여 1.21로 보았다(Xia et al., 2017).

경운에 따른 탄소축적계수는 관행 경운을 기준($F_{MG}=1.00$)으로 하여 부분경운과 무경운에 대한 계수가 설정되어 있으며, 이는 토지이용에 관계없이 각각 동일한 값을 보인다. 따라서, 이를 보완하고자 국내 고유 계수 개발을 위해 경운에 의한 토양탄소 축적에 관한 국내외 연구를 참조하여 비교하였다(Ro HM 2013; Lee BM 2014; Kim MT 2016; Kim SJ 2018). 국내 밭 연구사례의 경우 밭에서 1년간 수행된 사례만 보고되고 있기 때문에 국내 문헌수치를 채택하지 않고 IPCC 기본 계수를 활용하였다. 한편, 국내 논 연구사례의 경우 F_{MG} 가 1.30으로 나타났는데, IPCC에서 제안하는 F_{MG} 에는 논 연구사례가 포함되어 있지 않다는 것을 고려했을 때 위 값이 우리나라의 실정을 반영하는 수치라고 판단되어 이를 본 연구에 사용하기로 하였다.

IPCC는 유기물 투입에 의한 토양탄소 축적변화계수(F_I)를 작물의 종류, 작물잔사 환원, 녹비 재배, 퇴비 투입 등을 모두 포괄하여 반영하고 있기 때문에 농업환경 보전 프로그램의 각 활동 별 탄소 저장 증진 효과를 평가하기에 용이하지 않다. 이에 본 연구진은 유기물 투입에 따른 토양탄소 축적 변화계수를 작물의 종류와 잔사 환원 여부로만 한정하고 녹비작물재배 및 퇴비 투입 대해서는 별도의 계수를 두어 산정하였다.

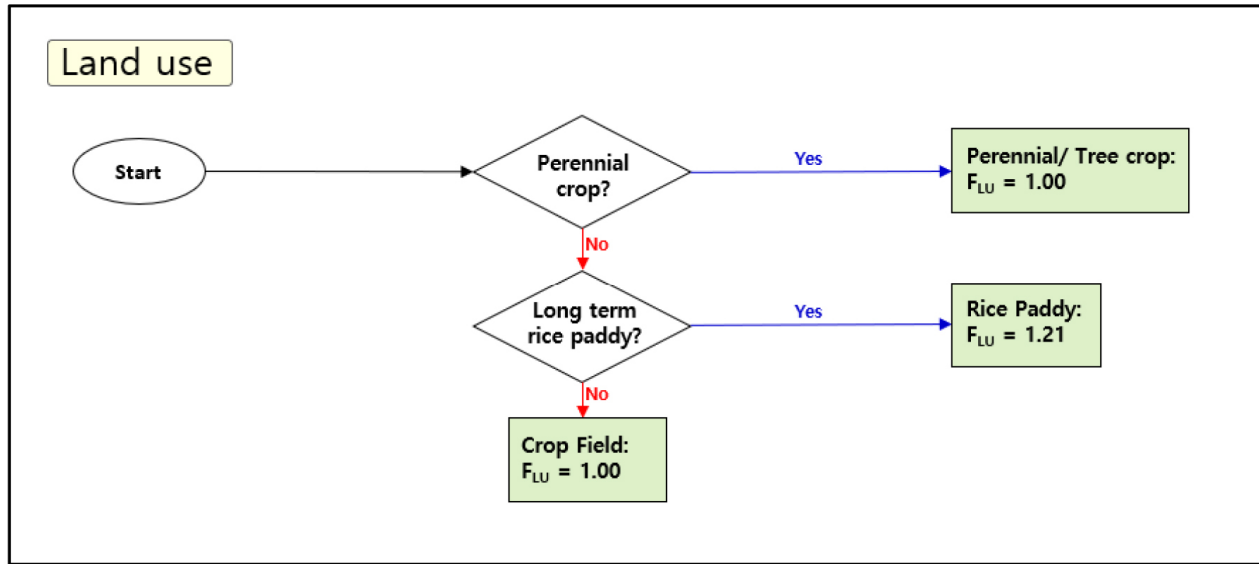


Fig. 1. Classification scheme for agricultural activities by land use

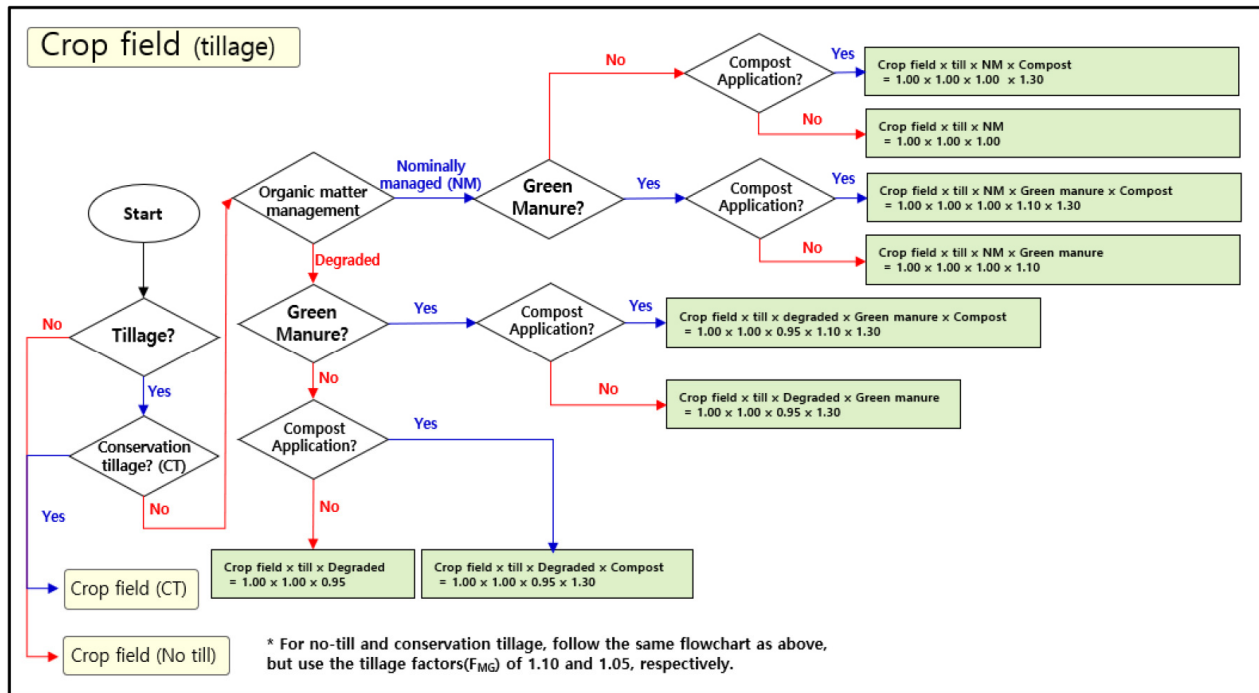


Fig. 2. Classification scheme for management activities on crop field with tillage

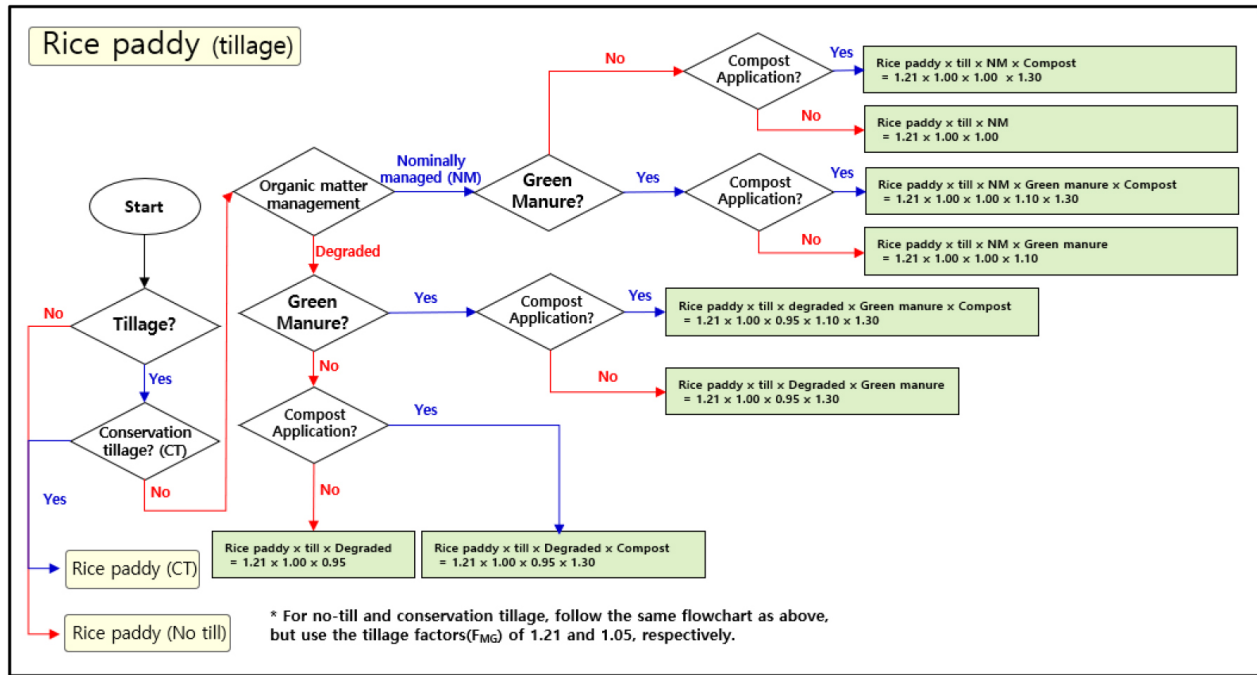


Fig. 3. Classification scheme for management activities on rice paddy with tillage

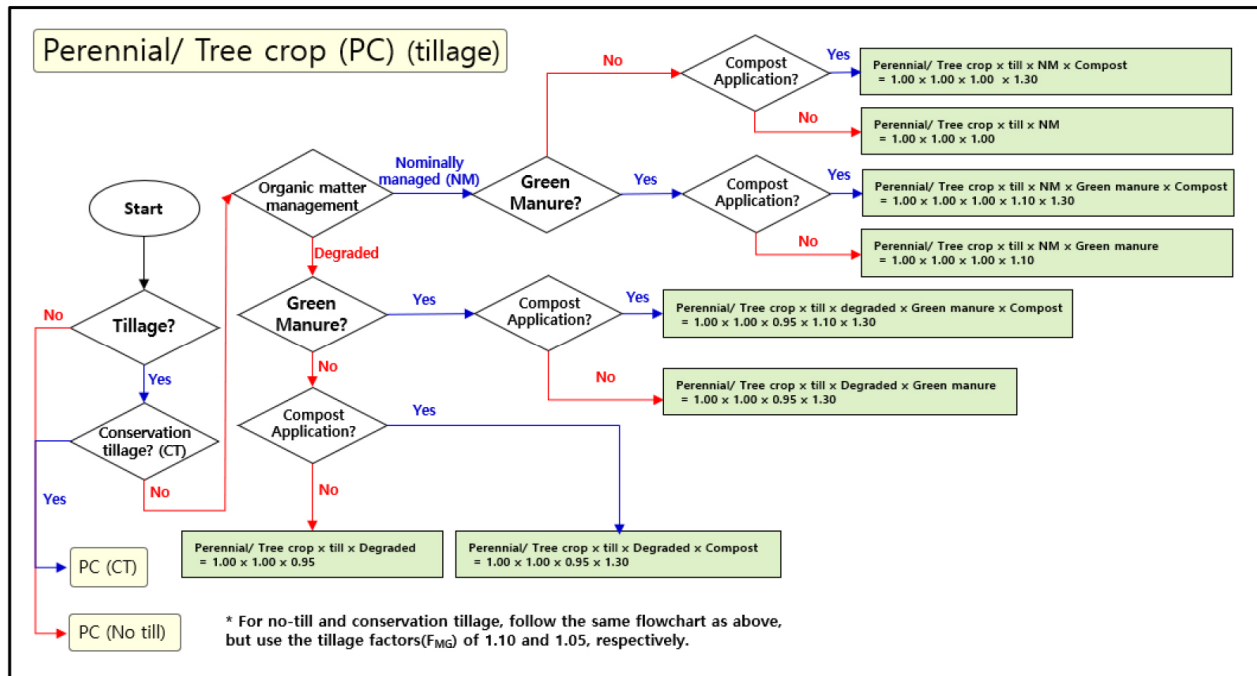


Fig. 4. Classification scheme for management activities on perennial/ tree crop with tillage

F_1 의 경우 일단 곡물류 재배 후 잔사를 전부 투입하거나 질소고정식물을 윤작하는 중간 수준의 유기물 투입을 기준($F_1=1.00$)으로 하였다. 낮은 수준의 유기물 투입은 애초에 작물의 잔사량이 적거나(담배, 채소, 면화 등), 작물 잔사를 수거 및 소각하여 토양에 환원시키지 않거나, 무기질 비료를 사용하지 않거나, 질소 고정 작물이 아닌 경우를 말하며, 이 경우 토양탄소 저장 계수는 기후조건에 맞추어 0.95로 하였다.

녹비작물 식재의 경우 국내 녹비 작물 재배에 따른 토양 유기탄소 변화량에 관련된 연구들을 조사하였으나 (Cho et al., 2012; Kim et al., 2018), 연구 기간이 짧고 표토층에 한정되어 그 신뢰도가 낮았다. 그러므로 본 연구에서는 잠정적으로 녹비작물 식재에 따른 토양탄소 축적 변화계수는 IPCC Tier 1 높은 수준의 유기물 투입 계수인 1.11을 적용하고, 현재 국립농업과학원에서 진행 중인 “영농관리에 따른 토양탄소 변화 국가 고유 계수 개발” 연구 과제에서 국가 고유 계수가 개발되면 이를 수정 반영하고자 한다.

퇴비 시용의 경우 IPCC Tier 1 방법론을 따르되, F_1 와 의 분리를 위해 High with manure 계수(1.44)에서 High without manure 계수(1.11)를 나눈 값인 1.30을 퇴비 시용에 의한 계수로 사용하였다. 이를 종합한 결과 농업환경 보전프로그램 대상 농경지의 토양 유기탄소 저장 증진 효과를 산정하기 위한 계수가 Table 5와 같이 선정되었다.

Table 5. Relative carbon stock change factors for management activities on cropland applied in this study

Management activities on cropland		Factors	
Land use	Rice paddy	1.21	
	Crop field	1.00	
	Perennial / Tree crop	1.00	
Tillage	Conventional tillage	1.00	
	Conservation tillage	1.05	
	No tillage	Rice paddy	1.30
		Crop field	1.10
Organic matter input	Crop residue	Degraded	0.95
		Nominally managed	1.00
	Green manure	1.11	
	Compost application	1.30	

농업환경 보전프로그램의 각 농경지에 적용되는 영농

활동에 따라 토양탄소 축적 변화계수를 선택할 수 있는 체계를 순서도로 표현하였다(Fig. 1~4). 우선, 토지이용은 IPCC의 분류체계를 따라서 논, 밭, 영년생 작물을 경작하는 영년생/과수로 구분하였다(Fig. 1).

논은 경운 여부에 따라 구분한 이후 유기물 투입 수준에 따라 degraded와 nominally managed로 나뉜다. 이후 녹비 작물 재배 여부와 퇴비 투입 여부를 선택하여 각 영농활동 조합에 따른 토양탄소 축적 변화계수를 Fig. 2와 같이 나타내었다. 부분경운과 무경운의 경우도 위와 마찬가지로 유p기물 투입 수준, 녹비 작물 재배 여부, 퇴비 투입 여부를 선택하여 계수를 도출하되, 경운 수준에 따른 토양탄소 축적 변화계수로 각각 1.05, 1.30를 적용해야 한다. 밭과 영년생/과수도 논과 마찬가지로 경운 수준, 유기물 투입 수준, 녹비 작물 재배 여부, 퇴비 투입 여부를 선택하여 영농활동 조합별 토양탄소 축적변화계수를 선택할 수 있다(Fig. 3 and Fig. 4).

3.2. 농경지토양 유기탄소 저장량 계산기구축 및 사례 연구

농경지 토양 유기탄소 저장량 계산기는 Fig. 5와 같다. 사용법은 다음과 같다. 우선 초기 화면에서 농지의 토성(HAC, LAC, 사질토, 화산회토)을 선택하여 기본 토양탄소 저장량을 설정하고, 농경지의 면적을 입력한다. 이후 현행 영농활동을 농경지 종류, 유기물 적용 수준, 녹비 및 퇴비의 적용, 경운 수준 등을 고려하여 입력한다. 이를 통해 현재 농경지 전체의 30 cm 깊이에서의 토양탄소 저장량이 산출된다. 이후, 토양탄소 저장량 증진을 목적으로 수행할 영농활동을 기존 영농활동 선택 시와 같은 방법으로 입력하면 20년 이후의 농경지 전체에 대한 토양탄소 저장 증가량이 도출된다. 한편, 바이오차의 적용에 의한 토양탄소 저장량(100년)은 별도로 설정되어 있는데, 이는 바이오차 투입량, 바이오차 원료물질 및 열분해 방법과 열분해 온도의 입력을 통해 산정할 수 있다.

상주시와 보령시의 농업환경 보전 프로그램에 참여 농지 면적은 각각 49.0 ha, 63.5 ha이다. 각 시에서 수행하고 있는 토양탄소 저장 증진 영농활동의 종류를 조사한 결과 상주시는 작물잔사 환원, 녹비작물 재배, 보존 경운 세가지가, 보령시는 작물잔사환원, 녹비작물 재배 두가지가 수행되고 있었다. 각 활동이 적용된 농지의 면적은 Table 6과 같다. 두개 또는 세개의 영농활동이 같이 이루어지고 있는 농지의 면적도 따로 계산하여 나타냈다. 상주시의

Cropland soil organic carbon storage calculator						
1. Select the soil texture, land use, tillage level, and organic matter input level (existing activity/new activity) and enter the cropland area.						
2. For cropland with known soil organic carbon storage, directly enter the value.						
3. After calculating the total carbon storage when maintaining the existing agricultural activities and the total carbon storage after 20 years when the agricultural environment is changed, the annual increase in carbon storage is calculated.						
4. For cropland with biochar, the increase in soil carbon storage from biochar input by inputting the biochar input and selecting feedstock of biochar, pyrolysis method (P=pyrolysis, G=gasification), and pyrolysis temperature could be calculated.						
Soil texture(IPCC defaults) --t C ha ⁻¹ , soil depth 0-30cm--	Cropland area -ha--	Annual change in SOC stocks --ton C yr ⁻¹ --	Biochar carbon stocks --ton C--	Gasoline vehicle travel distance --km yr ⁻¹ --	Petrol vehicle travel distance (conversion of biochar input)	
LAC 55	10.76	7.21	500.50	4,946.73	343.18	
<Existing management activities on cropland>						
Land use(F _{LU})	nic matter input level(F _i) - cropping sys	Green manure ^{**}	Compost ^{***}	Tillage level(F _{MU})	Total carbon storage	
	-----unitless-----				--ton C--	
rice paddy	Nominally managed	no input	input	tillage	930.90	
	1.21	1	1	1.3		
<New management activities on cropland>						
Land use(F _{LU})	nic matter input level(F _i) - cropping sys	Green manure ^{**}	Compost ^{***}	Tillage level(F _{MU})	Total carbon storage	
	-----unitless-----				--ton C--	
rice paddy	Nominally managed	input	input	conservation tillage	1,075.19	
	1.21	1	1.1	1.3	1.05	
* : Degraded, Nominally managed means the soil input level of organic matter, and the classification is as follows. Degraded : Occurs when there is removal of residues (via collection or burning), frequent bare-fallowing, production of crops yielding low residues (e.g., vegetables, tobacco, cotton), no mineral fertilization or N-fixing crops. Nominally managed : Representative for annual cropping with cereals where all crop residues are returned to the field. If residues are removed then supplemental organic matter (e.g., manure) is added. Also requires mineral fertilization or N-fixing crop in rotation. ** : The soil carbon stock change factor of green manure is the IPCC Tier 1 default value. *** : Degraded, Nominally managed refers to the soil input level of organic matter. The amount of increase in soil carbon storage by compost application in Degraded and Nominally managed cropland is replaced as 1.3, which is the value of high with manure factor divided by the high without manure factor in 2019 IPCC Guidelines because there is no factor for them.						
<Biochar input>						
Biochar input	Pyrolysis production process	Biochar production temperature	Carbon storage increase			
--kg--	-----unitless-----		--kg C--			
1000	P-wood	Low (350-450°C)	500.5			
		0.77	0.65			
※ This calculation method applies only to cropland maintained as cropland for more than 20 years.						

Fig. 5. Cropland soil organic carbon storage calculator

경우 논과 영년생/과수에서는 보존경운이 이루어지고 있는 논지의 면적이 가장 넓었고, 밭에서는 작물잔사 환원과 보존경운이 함께 적용된 논지의 면적이 가장 넓었다. 보령시의 경우 논과 밭에만 토양탄소 저장 증진 영농활동이 적용된 것으로 나타났다. 가장 널리 활용되는 활동은 작물잔사 환원이었으며, 일부 작물잔사 환원과 녹비작물 재배가 같이 이루어지고 있는 논지 또한 존재했다.

상주시와 보령시의 영농활동별 적용 농지 면적 자료를 바탕으로 각 시에서 기대되는 농경지 토양 유기탄소 증가량을 산정하였다(Table 7). 각 논지의 토성자료는 얻을 수 없었기 때문에 LAC, HAC, 사질토의 기본 토양유기탄소 축적계수의 평균 값을 사용하였다. 농업환경 보전 프로그램을 통해 상주시는 20년간 255 ton C, 보령시는 356 ton C을 토양에 추가적으로 저장된다는 결과를 얻을 수 있었다.

Table 6. Area of cropland where carbon storage enhancement agricultural activities are applied in Sangju-si and Boryeong-si (ha). Separated by activity, and the area where two or more agricultural activities were applied was also calculated separately

(a) Sangju: Total area 49.0 ha

Land use	Rice paddy	Crop Field	Perennial/ Tree crop
Management activities on cropland			
Crop residue retention	0.18	7.39	0.67
Green manure	-	-	-
Conservation tillage	27.4	1.26	1.2
Crop residue retention & conservation tillage	1.84	9.38	0.22
Crop residue retention & conservation tillage & green manure	-	1.71	-

(b) Boryeong: Total area 63.5 ha

Land use	Rice paddy	Crop Field	Perennial/ Tree crop
Management activities on cropland			
Crop residue retention	46.0	2.7	-
Green manure	-	-	-
Crop residue retention & green manure	4.10	0.27	-

Table 7. Expected amount of enhanced soil organic carbon storage by land use when the same agricultural activities are maintained for 20 years in Sangju-si and Boryeong-si

Land use	Sangju	Boryeong
	----- ton C -----	
Rice paddy	96.2	338.6
Crop field	150.2	18.2
Perennial/ Tree crop	8.6	-
Total	255.0	356.8

4. 결론

본 연구에서는 향후 확대 적용될 것으로 예상되는 농업 환경보전프로그램의 영농활동별 토양 내 탄소 저장 효과를 정량화 할 수 있는 방법론을 정립하였다. IPCC 토양탄소 저장부분의 방법론은 국내 영농활동의 특수성을 반영하지 못하고 있으므로 국내 실정을 고려하여 현장에서 시행되고 있는 영농활동들을 체계화하였다. 하지만, 국내 시행중인 다양한 영농활동에 대한 토양탄소 축적계수가 없으므로 IPCC의 기본 계수를 활용하여 영농활동별 토양탄소 저장량의 변화를 계산할 수 있는 도구를 개발하였다.

개발된 방법론은 스프레드시트 형태로 구축되어 사용자가 손쉽게 필지별 영농활동 변화에 따른 토양탄소 저장 변화량을 계산할 수 있다. 이는 일본, 미국 등에서 구축된 토양탄소 동역학적 모델에 비하여 기후, 토성 등 다양한 환경변수에 따른 변화를 고려하고 있지는 않지만, 현장에서 토양탄소에 대한 기초적 자료를 입력하여 손쉽게 사용할 수 있다는 장점이 있다. 다만, 본 연구에서 사용된 계수들이 대부분 IPCC의 기본계수라는 한계를 가지고 있

나, 현재 진행중인 연구 사업들에서 국가 고유계수가 등록된다면 국내 실정을 더 잘 반영한 탄소계산기로서의 역할을 할 것으로 기대된다.

사사

본 논문은 농촌진흥청 연구사업(세부과제번호: PJ015000032021)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Abbas F, Hammad HM, Ishaq W, Farooque AA, Bakhat HF, Zia Z, Fahad S, Farhad W, Cerdà A. 2020. A review of soil carbon dynamics resulting from agricultural practices. *Journal of Environmental Management*. 268. doi:10.1016/j.jenvman.2020.110319.
- Adhikari K., Owens, P.R., Libohova, Z., Miller, D.M., Wills, S.A., Nemecek, J. 2019. Assessing soil organic carbon stock of Wisconsin, USA and its fate under future land use and climate change. *Science of the Total Environment* 667, 833-845
- Amelung W, Bossio D, de Vries W, Kögel-Knabner I, Lehmann J, Amundson R, Bol R, Collins C, Lal R, Leifeld J, et al. 2020. Towards a global-scale soil climate mitigation strategy. *Nature Communications*. 11(1). doi:10.1038/s41467-020-18887-7.
- Australian Government. 2020. Understanding your soil carbon project Climate Solutions Fund user guide for measured soil carbon projects.
- Chenu C, Angers DA, Barré P, Derrien D, Arrouays D, Balesdent J. 2019. Increasing organic stocks in agricultural soils: Knowledge gaps and potential innovations. *Soil*

- and Tillage Research. 188:41-52. doi:10.1016/j.still.2018.04.011.
- Cho H-S, Seong K-Y, Park T-S, Seo M-C, Jeon W-T, Yang W-H, Kang H-W, Lee H-J. 2012. Changes in Carbon Amount of Soil and Rice Plant as Influenced by the Cultivation of Different Green Manure Crops. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*. 45(6):1058-1064. doi:10.7745/kjssf.2012.45.6.1058.
- Cotrufo MF, Soong JL, Horton AJ, Campbell EE, Haddix ML, Wall DH, Parton WJ. 2015. Formation of soil organic matter via biochemical and physical pathways of litter mass loss. *Nature Geoscience*. 8(10):776-779. doi:10.1038/ngeo2520.
- FACT. 2019. *Low-carbon Agriculture Technology Guide*. Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea.
2021. *Guidelines for measurement reporting and verification in National Greenhouse Gas inventory*. Seoul.
- Gross A, Glaser B. 2021. Meta-analysis on how manure application changes soil organic carbon storage. *Scientific Reports*. 11(1). doi:10.1038/s41598-021-82739-7.
- IPCC. 2019a. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Chapter 5_Volume 4 (AFOLU). France.
- IPCC. 2019b. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 4 (AFOLU) Appendix 4 Method for Estimating the Change in Mineral Soil Organic Carbon Stocks from Biochar Amendments: Basis for Future Methodological Development.
- Kim G-Y, Lee S-I, Lee J-S, Jeong H-C, Choi E-J. 2018. Evaluation of N₂O Emissions by Nutrient Source in Soybean and Pepper Fields. *Environmental Biology Research*. 36(4):680-686. doi:10.11626/kjeb.2018.36.4.680.
- Kim MT. 2016. Study of impacts of different tillage managements on paddy soil fertility.
- Kim SJ. 2018. Development of on-till farming system for low-carbon production of food crops to adjust to climate change.
- Lal R. 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*. 123(1-2):1-22. doi:10.1016/j.geoderma.2004.01.032.
- Lal R. 2009. Challenges and opportunities in soil organic matter research. In: *European Journal of Soil Science*. Vol. 60. p. 158-169.
- Lee BM. 2014. Development of Organic Corn Production Technology Using Green Manure and No-tillage System.
- Lee GJ. 2019. Agriculture and Rural Carbon Offset Program.
- Liu S, Zhang Y, Zong Y, Hu Z, Wu S, Zhou J, Jin Y, Zou J. 2016. Response of soil carbon dioxide fluxes, soil organic carbon and microbial biomass carbon to biochar amendment: A meta-analysis. *GCB Bioenergy*. 8(2):392-406. doi:10.1111/gcbb.12265.
- Ma D, Yin L, Ju W, Li X, Liu X, Deng X, Wang S. 2021. Meta-analysis of green manure effects on soil properties and crop yield in northern China. *Field Crops Research*. 266. doi:10.1016/j.fcr.2021.108146.
- MAFRA. 2020a. 2020 Agricultural Environment Conservation Program Implementation Guidelines.
- MAFRA. 2020b. Comprehensive Guidelines for Direct Payment System for Public Interest.
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. 2020. 2020 Agricultural Environment Conservation Program Implementation Guidelines.
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. 2020. Comprehensive Guidelines for Direct Payment System for Public Interest.
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. 2019. *Low-carbon Agriculture Technology Guide*. Foundation of Agri, Tech. Commercialization & Transfer.
- Ministry of Environment., Korea Environmental Industry & Technology Institute. Agriculture and Rural Carbon Offset Program. (Korean without English abstract)
- Ministry of Environment. 2020. National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea. Greenhouse Gas Inventory and Research Center.
- Rural development administration. 2013. Technology development for enhanced soil carbon stabilization and storage capacity under different land-use types. Project No. PJ007409. (Korean without English abstract)
- Shirato Y. 2020. Use of models to evaluate carbon

- sequestration in agricultural soils. *Soil Science and Plant Nutrition*. 66(1):21-27. doi:10.1080/00380768.2019.1702477.
- Statistics Korea. 2020. Results of the 2019 arable land survey.
- Sun W, Canadell JG, Yu Lijun, Yu Lingfei, Zhang W, Smith P, Fischer T, Huang Y. 2020. Climate drives global soil carbon sequestration and crop yield changes under conservation agriculture. *Global Change Biology*. 26(6):3325-3335. doi:10.1111/gcb.15001.
- Xia X, Yang Z, Xue Y, Shao X, Yu T, Hou Q. 2017. Spatial analysis of land use change effect on soil organic carbon stocks in the eastern regions of China between 1980 and 2000. *Geoscience Frontiers*. 8(3):597-603. doi:10.1016/j.gsf.2016.06.003.
- Yokozawa M., Shirato Y., Sakamoto T., Yonemura S., Nakai M., Ohkura T. 2010. Use of the RothC model to estimate the carbon sequestration potential of organic matter application in Japanese arable soils. *Soil Science & Plant Nutrition* 56, 168-176