

Short communication

<https://doi.org/10.7745/KJSSF.2018.51.4.317>

pISSN : 0367-6315 eISSN : 2288-2162

Development of Soil Organic Carbon Reference for Advancing National Greenhouse Gas Inventory

Seong-Jin Park*, Chang-Hoon Lee, Myung-Sook Kim, and Seok-Cheol Kim

Soil & Fertilizer Division, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju 55365, Korea

*Corresponding author: archha98@korea.kr

ABSTRACT

Received: September 10, 2018**Revised:** October 31, 2018**Accepted:** November 2, 2018

Soil Organic Carbon (SOC) plays an important role in the global carbon cycle and climate change. The carbon stored in soil is estimated to be 2-3 times of the atmosphere's carbon. In this study, we estimated SOC storage at national scale and generated country specific factor related Soil Organic Carbon reference (SOCref) alternative IPCC's default value. The soil data was collected about 5,052 pedons and 21,170 layers by Korean Rural Development Administration (RDA) from 1970 to 1999. Because of lacking of bulk density (BD), we generated BD using Adam's equation (1999) and used to equal-area smoothing spline depth function for calculating carbon density. The analytical results showed that the total amount of soil organic carbon in South Korea was about 395 megaton, and that the average carbon density was about 45.7 ton C ha⁻¹. The average and confidence interval of carbon density according to IPCC classification's 4 categories ; Sandy, Low Activity Clay (LAC), High Activity Clay (HAC), and Volcanic soil type were 19.7±4.5 Mg C ha⁻¹, 37.6±2.1, 39.1±16.2, and 127.8±16.4 respectively. We also compared the SOCref to 2006 IPCC Guideline's default value. The results showed SOCref of Sandy, LAC soil type and HAC was lower, and Volcanic soil type was higher than IPCC's default value. This study presents basic data and an analysis method for carbon stock and storage study and also provides scientific support for policy making efforts to control CO₂ emission in South Korea.

Keywords: Soil Organic Carbon, Carbon storage, SOC reference

Soil Organic Carbon reference (SOCref) of South Korea according to IPCC's soil type classification

Soil Type	No. of soil series	Mean (SOCref)	SD	Min	Max	CI (95%)	IPCC default
Sandy	30	19.7	12.6	3.8	49.5	4.5	34
LAC (Low Activity Clay)	321	37.6	19.6	4.6	135.2	2.1	63
HAC (High Activity Clay)	7	39.1	21.9	9.5	78.9	16.2	88
Volcanic	45	127.8	56.1	9.8	224.2	16.4	80



Introduction

토양 속 유기탄소는 동식물의 유체가 섞여 들어간 생명활동의 산물로서 흙을 부드럽게 하고 흙속 동식물의 영양분을 공급하는 역할을 한다. 토양은 이러한 유기탄소를 토양에 저장함으로써 기후변화의 원인이 되는 이산화탄소를 가두어두는 저장고의 역할을 한다. 따라서 기후변화 완화를 위해 얼마나 많은 탄소가 토양에 축적되어 있으며 얼마나 더 많은 탄소를 저장할 수 있을지에 대한 연구가 최근 활발히 이루어지고 있다. Batjes (1995)는 전지구의 토양의 2 m, 1 m, 30 cm 깊이에 각각 2,157-2,293 Pg (10^{15} g), 1,462-1,548, 684-724의 탄소가 저장돼 있다고 하였고, Eswaran et al. (1995)은 1 m 깊이에 1,576 Pg의 탄소가 저장돼 있다고 한 바 있다. 이는 대기 중 탄소량인 750 Pg C (IPCC, 2003)의 2-3배에 해당하는 양이다.

자연 상태의 토양에서 탄소의 함량을 좌우하는 주요 요인으로는 온도, 강수량, 증발산량 및 모재 등이 있다. 온도의 상승과 적절한 습도는 토양 미생물의 활동을 좋게 하고 유기물의 분해를 촉진해 대기 중으로 토양 탄소 배출량을 증가시키고, 모재는 자연적으로 토양이 가진 탄소의 함량을 결정한다. 이러한 조건 외에도 토지이용이나 토지 관리 방법에 따라 토양 내 탄소의 함량이 달라진다. 우리나라 토양의 모재는 대부분이 화강편마암으로 유기물 함량이 적은 무기질 토양으로 구성되어 있다. 무기질 토양은 광질 토양이라고도 하며 암석이 기계적 풍화작용에 의해 형성된 파편이나 화학적 풍화과정에서 형성된 2차 광물로 일반적으로 유기탄소의 함량이 12% 미만이다.

2015년 파리협정 (제21차 유엔기후변화협약)에 따라 모든 국가는 2030년까지 온실가스 감축목표를 설정하고 목표를 달성하기 위한 노력을 기울이도록 약속한 바 있다. 그중 LULUCF (Land Use, Land Use Change and Forestry) 분야는 토양탄소 축적량 변화에 의한 이산화탄소 배출량 산정·보고하고 있다 (NIR, 2017). IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)는 2003 GPG (Good Practice Guidance)와 IPCC 2006 가이드라인에서 토양탄소 축적변화량 산정을 위한 방법론을 제공하고 있는데 토양탄소축적 변화량 산정은 기후대에 따른 토양 종류별 기본 탄소 값 (Soil Organic Carbon reference, SOCref)에 면적을 곱하여 산정하는 방식이다. 산정방법에 따라 IPCC의 기본 탄소 값 (default)을 사용할 경우 Tier 1, 자국의 환경에 맞는 탄소 값을 개발해 적용할 경우 Tier 2로 수준을 구분한다. 현재 우리나라는 개발된 국가 고유계수가 없어 Tier 1 수준으로 온실가스 배출량을 산정하고 있다. 반면 Annex 1 국가에 포함되어 있는 일본은 자국의 토양분류 체계에 따라 7가지의 토양 목 (order) 별 고유계수를 개발해 적용하고 있으며 국토 면적이 상대적으로 큰 호주는 표본조사를 통해 1 km × 1 km 격자 단위의 평균 탄소함량을 고유계수로 사용하고 있다. 우리나라도 토양탄소 축적 계수 개발을 통해 토지이용변화에 따른 온실가스 변화량 산정방법의 고도화 노력이 필요하며, 국가 탄소 저장량의 정확한 산정을 통해 기후변화에 적극적으로 대응하고 국가 온실가스 감축목표 달성에 동참할 수 있다. 그러나 국가 전체를 대표할 수 있을 만큼의 시료 지점 수 확보가 어렵고 용적밀도와 자갈함량 데이터의 부재와 깊이별로 함량을 보유하고 있는 데이터의 부재로 인해 지금까지 연구가 미흡하였다. 따라서 본 연구에서는 시군별 정밀토양 조사 자료를 활용하여 기본 토양탄소 축적계수 (SOCref)에 대한 국가 고유계수를 개발하고 국가단위의 탄소 저장량 산정을 하고자 하였다.

Materials and Methods

Database (DB) 전국을 대표할 수 있는 토양 DB를 활용하기 위해 시군별 정밀토양조사사업 (약 '70-'99, 농촌진흥청)의 5,052 지점 (pedon), 21,170 층위 (layer)를 이용하였다 (Table 1). 토양 DB에는 유기탄소 축적량 산정에 필요

한 모래, 미사, 점토 비율, 자갈함량, 유기물함량, 토양통 구분, 토성 및 기타 이화학적성 (pH, CEC, 양이온 등)을 포함하고 있다.

Table 1. Descriptive statistics of using soil database.

	No. of layers	unit	Mean	SD [†]	Min	Max
pH	20,923		5.71	0.81	0.02	9.90
Organic matter	20,915	%	1.55	1.74	0.01	67.23
Sand	21,170	%	42.71	23.88	0.00	99.60
Silt	21,160	%	38.02	16.73	0.00	89.70
Clay	21,162	%	19.25	10.77	0.00	74.70
Gravel	13,805	%	13.12	14.44	0.00	88.30

[†]SD : Standard deviation.

토양 층위 표준화 토양통별로 조사된 데이터는 깊이가 상이하여 층위별 표준화를 위해 Equal-area spline profile function을 이용하였다 (Bishop et al., 1999). Spline function은 측정된 층위별 데이터를 곡선으로 이어 용적 밀도와 유기물 함량을 1 cm 간격의 층위별 데이터로 변환할 수 있다. 본 연구에서는 IPCC의 고유계수 산정을 위해 토양 깊이를 0-30 cm로 표준화 하였다. 이를 위해 R software의 ithir 패키지에 있는 es-spline Tool을 이용하였고 최적화를 위한 lambda (smoothing parameter) 값은 0.1을 적용하였다 (Malone et al., 2009).

용적밀도 추정 시군별 정밀 토양조사 자료에는 용적밀도를 포함하고 있지 않기 때문에 Hong (2010) 등의 선행 연구에서 이뤄진 Mineral bulk density 산정식과 Adams (1973)의 식을 이용하여 용적밀도를 계산하였다 (Eq. 1, Eq. 1-1). 또한 용적밀도가 낮고 유기물 함량이 많을 것으로 예상되는 화산회토의 경우 Tempel (1996)과 Hong et al. (2013)의 산정식에 따라 구분하여 산정하였다 (Eq. 2).

Eq. 1. Equation of predicting Bulk Density (BDmin)

$$BD(g/cm^3) = \frac{100}{\left(\frac{OM(\%)}{pOM} + \frac{(100 - OM(\%))}{pM}\right)}$$

$$pOM = 0.224g/cm^3$$

Eq. 1-1. Equation of predicting Mineral Bulk Density

$$BD_{min} = 1.017 + 0.0032 * sand + 0.054 * \log(\text{depth})$$

Eq. 2. Equation of predicting volcanic soil's Bulk Density (BDmin)

$$BD(g\text{ cm}^{-1}) = 1.02 - 0.156 \log(OM)$$

토양통별 carbon density, SOC storage 토양통별로 0-30 cm 깊이의 탄소함량을 추정하기 위하여 IPCC 지침이 참조하고 있는 Batjes (1996) 식을 이용하여 계산하였다. 이때 carbon concentration은 유기물(Organic matter)의 함량에 전환계수 1.724를 곱하여 구하였고, 깊이는 각 층위의 평균깊이를 적용하였다. 전국 토양통별 분포 면적은 토양도(Korean soil map)을 이용하여 산출하고 우리나라 전체 면적대비 국가 탄소 저장량을 구하였다(Eq. 3, Eq. 3-1).

Eq. 3. Equation of calculating SOC density

$$SOC\text{ density}(ton\text{ C ha}^{-1}) = \sum_{i=1}^k \frac{\{Bi\ Ci\ Di\}}{10} (1 - Gi)$$

Where,

Bi is the Bulk density ($g\text{ cm}^{-3}$)

Ci is Carbon concentration ($g\text{ kg}^{-1}$)

Di is the thickness (cm)

Gi is the gravel and stone content (%)

Eq. 3-1. Calculation of total SOC storage

$$SOC\ stock(Mt) = \sum_{i=1}^n \{SOC_{di} * A_i * 10^{-3}\}$$

Where,

SOC_{di} is SOC density ($ton\text{ C ha}^{-1}$)

A_i, is area of south korea

10^{-3} is conversion factor.

토양 분류 및 고유계수 IPCC에서는 기본 토양유기탄소 축적계수(SOC_{ref})를 기후대에 따라 6가지로 토양형(HAC, LAC, SANDY, VOLCANIC, WETLAND, SPODIC)으로 구분하여 제공하고 있다(Table 2).

국가 고유계수 개발을 위한 방법 중 신뢰도를 높일 수 있는 가장 좋은 방법은 IPCC의 분류체계에 따라 토양형을 구분하는 것이다. 이번 연구에서도 시군별 정밀토양조사 자료를 이용한 토양형 구분을 위해 IPCC 기준을 적용하였다(Table 3). Sandy형은 모래 함량이 70% 이상, 점토 함량이 8% 미만인 토양으로 가장 먼저 분류한 후 WRB 분류의 Andosol과 USDA의 Andisol로 분류된 토양을 Volcanic 토양으로 구분하였다. 마지막으로 HAC와 LAC형 토양의 구분은 CEC 24를 기준으로 이상인 것은 HAC에 포함하고 미만인 것은 LAC로 분류하여 각 토양형별로 carbon density의 평균과 오차 범위(95%)를 적용해 국가 고유계수를 산정하였다.

Table 2. IPCC's default reference value of SOC for mineral soils.Unit: C ton ha⁻¹ (0-30cm depth)

Climate region	HAC ¹⁾	LAC ²⁾	Sandy ³⁾	Spodic ⁴⁾	Volcanic ⁵⁾	wetland ⁶⁾
Boreal	68	NA [†]	10 [#]	117	20	146
Cold temperate, dry	50	33	34	NA	20	87
Cold temperate, moist	95	85	71	115	130	88
Warm temperate, dry	38	24	19	NA	70	88
Warm temperate, moist	88	63	34	NA	80	88
Tropical, dry	38	35	31	NA	50	86
Tropical, moist	65	47	39	NA	70	86
Tropical, wet	44	60	66	NA	130	86
Tropical montane	88	63	34	NA	80	

[†]NA denotes 'not applicable' because these soils do not normally occur in some climate zones.

Table 3. Methodology of classification according to IPCC guideline.

4 categories	IPCC's methodology	Applied methodology
Sandy	Sand >70% and Clay <8% (WRB) Arenosols (USDA) Psammets (Suborder)	Sand >70% and Clay <8%
Volcanics	(WRB) Andosols (USDA) Andisols(Order)	Andisols
HAC	(WRB) Leptosols, Vertisols, Kastanozems, Chernozems, Chernozems, Phaeozems, Luvisols, Alisols, Albeluvisols, Solonetz, Calcisols, Cypsisols, Umbrisols, Cambisols, Regosols (USDA) Mollisols, Vertisols, based-Alfisols, Aridisols, Inceptisols	CEC: ≥24 cmol/kg
LAC	(WRB) Acrisols, Lixisols, Nitisols, Ferralsols, Durisols (USDA) Ultisols, Oxisols, acidic Alfisols	CEC: <24 cmol/kg

Results and Discussion

토양 층위 표준화 (Spline depth method) Fig. 1에서 보는 바와 같이 시군별 정밀토양조사 자료의 조사층위가 통별로 상이하다. 1(a)는 5개 층위에서 유기물 함량이 조사된 반면, 1(b)에서는 4개 층위, 1(c)에서는 3개 층위만 자료가 존재하므로 0에서 30 cm 까지 1 cm 간격의 데이터를 얻기 위해 Spline depth function을 이용하였다. 결과적으로

- 1) Soils with high activity clay (HAC) minerals are lightly to moderately weathered soils, which are dominated by 2:1 silicate clay minerals (in the World Reference Base for Soil Resources (WRB) classification these include Leptosols, Vertisols, Kastanozems, Chernozems, Phaeozems, Luvisols, Alisols, Albeluvisols, Solonetz, Calcisols, Gypsisols, Umbrisols, Cambisols, Regosols; in USDA classification includes Mollisols, Vertisols, high-base status Alfisols, Aridisols, Inceptisols).
- 2) Soils with low activity clay (LAC) minerals are highly weathered soils, dominated by 1:1 clay minerals and amorphous iron and aluminium oxides (in WRB classification includes Acrisols, Lixisols, Nitisols, Ferralsols, Durisols; in USDA classification includes Ultisols, Oxisols, acidic Alfisols).
- 3) Includes all soils (regardless of taxonomic classification) having > 70% sand and < 8% clay, based on standard textural analyses (in WRB classification includes Arenosols; in USDA classification includes Psammets).
- 4) Soils exhibiting strong podzolization (in WRB classification includes Podzols; in USDA classification Spodosols)
- 5) Soils derived from volcanic ash with allophanic mineralogy (in WRB classification Andosols; in USDA classification Andisols)
- 6) Soils with restricted drainage leading to periodic flooding and anaerobic conditions (in WRB classification Gleysols; in USDA classification Aquic suborders).

1(a)와 같이 대부분 잘 적용이 되었으나 몇몇 토양 데이터는 1(b)와 같이 상위 표층과 하위 층과의 함량차가 많아 비정상적으로 감소(30-35 cm)하는 부분이 발생하였다. 또한 유기물 함량이 매우 낮을 경우 추세선이 음수가 되어 결국 전체 깊이에서의 함량이 과소평가되는 결과를 가져오게 되는데 이런 경우 음수는 삭제하고 0으로 보정하였다. 비록 몇몇 토양통 들에서 이런 문제가 나타났지만 대부분의 토양통에서 Spline depth function은 층위별 데이터를 생산해 내는데 유용하였다.

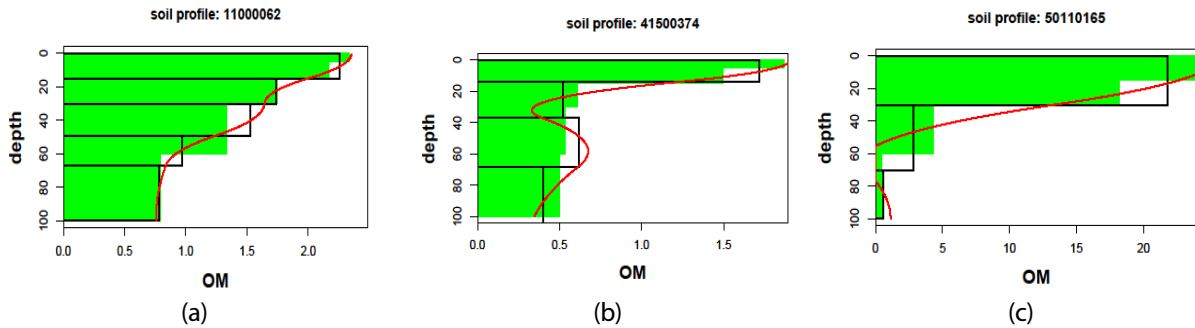


Fig. 1. Performance of spline depth function fitted the OM concentration.

Bulk density, carbon density 405개 토양통에서 0-30 cm 깊이의 표준화된 데이터를 이용하여 용적밀도와 carbon density를 산정하고 그 평균값을 Table 4에 나타내었다. 용적밀도의 평균은 1.15였고 중앙값은 1.16으로 일반적으로 알려진 용적밀도 함량인 1.3 보다 낮았다. 이는 낮은 용적밀도를 갖는 Volcanic형 토양이 많이 포함되었기 때문인 것으로 판단된다. 용적밀도의 최솟값은 Andisol 계열의 PYEONGDAE 통이었고, 최댓값은 사질계열의 Entisols 토양인 INSANG 통이었다. Carbon density는 평균 45.7 t C ha⁻¹, 중앙값은 35.1 t C ha⁻¹ 이었으며, 최솟값과 최댓값의 범위가 4.8에서 224.2였다. Carbon density는 사질계열인 INSANG 통에서 가장 낮은 함량을 보였고 Andisol에 속하는 TOPYEONG 통이 가장 높은 함량을 가진 것으로 조사되었다.

Table 4. Bulk density and Carbon density splined data.

Soil series (n = 405)	Unit	Mean	Mid	Min	Max
BD	g cm ⁻³	1.15	1.16	0.56 PYEONGDAE series	1.46 INSANG series
Carbon density	t C ha ⁻¹	45.7	35.1	3.8 INSANG series	224.2 TOPYEONG series

Soil type 분류 국내의 토양분류체계는 미국 농무성 (USDA)의 분류기준인 Soil taxonomy를 따르고 토양통 (Soil series)을 기본단위로 상위 분류항목인 토양목 (order)과 아목 (suborder)으로 구분되어있다. Table 2에는 토양형별 자연 식생 하에서의 기후대별 기본 토양유기탄소의 축적량인 SORref 인용값을 나타내고 있다. 강우량과 증발산량을 기준으로 우리나라는 난온대 습윤 (Warm temperate, moist)의 기후대에 속하며 이때 적용 가능한 인용 값을 보여준다.

IPCC 가이드라인은 토양분류를 위해 세계토양분류체계 (WRB)와 Soil taxonomy에 속하는 토양목, 아목의 예시를 보여주는데 우리나라의 토양목을 IPCC 분류체계에 직접 적용하면 다음과 같이 몇 가지 문제가 발생한다. 첫째, HAC 토양을 구분하기 위한 high-base status Alfisol과 둘째, LAC 분류를 위한 Acid-Alfisol이 분류되어 있지 않고, 셋째, Volcanic 토양 구분은 WRB의 Andosol과 USDA의 Andisol의 분류가 일치하지 않는다. 따라서 IPCC 분류기준 (Table 3)을 통해 투명성을 확보하고자 하였고 그 결과, 우리나라의 모든 토양통 (405개)을 IPCC 토양형에 맞추어 4가지 토양형 (Soil Type)으로 재분류하였다. 분류 결과 아곡통, 봉산통 등 324개의 토양통이 LAC에 포함되었으며, 안덕통, 우도통 등 45개가 Volcanic 통에 속하였다. Sandy형은 백수통, 인상통, 하곡통 등 30개의 토양통이 포함되고 모산통, 정자통 등 7개의 토양통이 HAC로 분류되었다 (Table 5). 무기질 토양외의 유기질 토양으로 구분되는 이호통과, 용호통은 그 외의 토양분류로 표시하였다.

토양도 (Soil map)를 이용하여 각 토양형이 차지하는 면적 비율을 살펴보면 LAC (9634944 ha, 96%) > Sandy (161586 ha, 1.6%) > Volcanic (135491 ha, 1.35%) > HAC (80291 ha, 0.88%) 형 순이었다. 우리나라 전체 면적의 0.003%에 해당되는 유기질 토양 (Histosols)은 용호통과 이호통 두 개의 토양통으로 구분되었고 분류방법상 HAC 토양에 포함되었다. 4개 토양형의 국내 분포는 Fig. 2와 같다. LAC형 분포는 전국의 대부분을 차지하며 Sandy형 토양은 전국에 널리 불규칙하게 분포되어 있다. 반면 Volcanic형 토양은 제주도와 울릉도 부분에 밀집되어 있으며 HAC형 토양은 강원도 일대에 주로 분포하는 것으로 나타났다 (Fig. 2).

SOC reference, SOC storage Table 4의 평균값과 중앙값은 조사지점에 대한 평균값으로, 토양분류와 분포 면적에 대한 고려가 없었기 때문에 우리나라 전체의 단위면적 (ha) 당 평균함량이라고 할 수는 없다. 국가 고유계수를 위해 IPCC 분류기준에 따라 토양형을 분류하여 우리나라 토양형별 탄소 SOCref를 계산한 결과는 Table 6과 같다. 우리나라에 존재하는 4가지 토양형인 Sandy, LAC, HAC, Volcanic 형 토양들의 carbon density는 각각 $19.7 \pm 4.5 \text{ t C ha}^{-1}$, 37.6 ± 2.1 , 39.1 ± 16.2 , 127.8 ± 18.1 로 분석되었다. 우리나라의 평균기온, 강수량 등을 고려하면 난온대/습윤 기후대에 속하게 되는데 이때 IPCC가 제공하는 기본 값은 Sandy, LAC, HAC, Volcanic 형에서 각각 34, 63, 88, 80 이다. 즉,

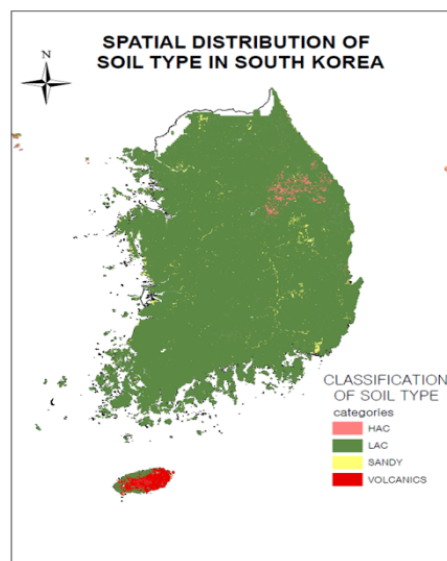


Fig. 2. Spatial distribution of soil type by IPCC in South Korea.

Table 5. The result of classification by IPCC soil type.

Classification	Soil series
Sandy (30 series) (161586 ha)	BAEGSU, BICHEON, CHUNCHEON, DAEBON, DAEHEUL, DAIN, DEOGGYE, DOSAN, GAPA, GWACHEON, HAERI, HAGGOG, HASA, HONGCHEON, HWABONG, HWANGRYONG, IBSEOG, JANGCHEON, MYEONGJI, NAGCHEON, NAGDONG, NOEGOG, ONPYEONG, SADONG, SADU, SINDAB, TOGYE, YEOMPO, DOAM, INSANG
Volcanics (45 series) (135491 ha)	ANDEOG, ARA, BYEONGAG, EUIGUI, GAMSAN, GUJWA, GUNSAN, HAENGWEON, HANGYEONG, HANRIM, HEUGAG INSEONG, JOGAG JEONGBANG, JUNGEOM, JUNGMUN, MIAG, MINAG, NAMWEON, NOGSAN, NONGO, NORO, PYEONGDAE, PYOSEON, SEONGIN, SINEOM, SONGAG, SONGDANG, TOPYEONG, TOSAN, UDO, ULREUNG, WEOLSAN, WUIMI, BONGSEONG, GEUMAG, GIMYEONG, HAMO, HOESU, ALBONG, ANDEOG, HONGMUN, NARI, SANBANG, WEOLRYEONG
HAC (7 series) (80291 ha)	JEONGJA, JUGAM, MAESAN, MITAN, MOSAN, DOKDO, INOG
LAC (321 series) (9634944 ha)	ABGOG, AEWEOL, AGOG, AGYANG, ANGYE, ANMI, ANRYONG, ASAN, BAEGGU, BAEGRYEONG, BAEGSAN, BANCHEON, BANGGI, BANGGOG, BANGOG, BANHO, BANSAN, BEOMPYEONG, BIGOG, BOGCHEON, BOGNAE, BONGGOG, BONGGYE, BONGNAM, BONGRIM, BONGSAN, BONRYANG, BUGOG, BUGPYEONG, BUYEO, BUYONG, CHAHANG, CHANGGOG, CHANGPYEONG, CHEOLWEON, CHEONBU, CHEONGGYE, CHEONGOG, CHEONGPUNG, CHEONGRYONG, CHEONGSAN, CHEONGSIM, CHEONGWEON, CHEONPYEONG, CHILGOG, CHILWEON, CHOBONG, CHOGYE, CHOJEONG, CHUGYE, CHUNDO, CHUNPO, CHUSAN, DAEGOG, DAEGU, DAEHEUNG, DAEJEONG, DAEPYEONG, DAESAN, DAEWEON, DALCHEON, DALDONG, DANBUG, DANSEONG, DAPYEONG, DEOGCHEON, DEOGGOG, DEOGHA, DEOGPYEONG, DEOGSAN, DEUNGGU, DOCHEON, DODONG, DOGOG, DOGYE, DOJEON, DONGAM, DONGGUI, DONGHO, DONGHONG, DONGSONG, EUISEONG, EUMSEONG, EUNGOG, GACHEON, GAGHWA, GAGOG, GALGOG, GALJEON, GAMCHEON, GAMGOG, GANGDONG, GANGJEONG, GANGJIN, GANGREUNG, GANGSEO, GAPO, GEUMCHEON, GEUMGOG, GEUMJI, GEUMJIN, GEUMSEO, GEUNSAN, GIMHAE, GIMJE, GOCHEON, GOESAN, GOHEUNG, GONGDEOG, GONGSAN, GONGSEONG, GOPYEONG, GORYEONG, GOSAN, GUEOM, GUGOG, GUIBAN, GUPO, GWANAG, GWANGHWAL, GWANGJU, GWANGPO, GWANGSAN, GWARIM, GYEONGSAN, GYORAE, GYUAM, HABIN, HAEAN, HAECHEOG, HAENGGOG, HAENGSAN, HAGPO, HAGSAN, HAGSEONG, HAJEONG, HAMCHANG, HAMPYEONG, HAWEON, HEUGSEOG, HEUNGPYEONG, HOEGOG, HOGYE, HONAM, HWADONG, HWASAN, HWASU, HWASUN, HYANGHO, HYANGMOG, HYOCHEON, ICHEON, IDO, IHYEON, ILPYEONG, IMDONG, IMGOG, IMJA, IMOG, IMSAN, INJE, ISAN, IWEON, JANGGYE, JANGHO, JANGPA, JANGSAN, JANGSEONG, JANGWEON, JANGYU, JECHEON, JEJU, JEODONG, JEOMGOG, JEONBUG, JEONGDONG, JEONGEUB, JEONNAM, JIGOG, JINCHEON, JINDO, JINGOG, JINMOG, JISAN, JOCHEON, JONGGOG, JUCHEON, JUGGOG, JUGOG, JUNGDONG, MAEBONG, MAEGOG, MAGOG, MAJI, MANGSIL, MANGYEONG, MANSEONG, MARYEONG, MASAN, MISAN, MIWEON, MUDEUNG, MUI, MULGEUM, MUNGYEONG, MUNPO, MUREUNG, NAGSAN, NAGSEO, NAMGOG, NAMGYE, NAMPYEONG, NAMSAN, NASAN, NOGJEON, NONSAN, OCHEON, ODAE, OESAN, OGCHEON, OGDONG, OGGYE, OPYEONG, ORA, OSAN, PAJU, PANGOG, PODU, POGOG, PORI, POSEUNG, PUNGCHEON, PYEONGAN, PYEONGCHANG, PYEONGHAE, PYEONGJEON, PYEONGTAE, RYUCHEON, SACHON, SAMAM, SAMGAG, SANCHEONG, SANGJU, SANGYE, SARA, SEOGCHEON, SEOGGYE, SEOGTO, SEONGSAN, SEOTAN, SEUNGJU, SIMCHEON, SINBUL, SINGI, SINHEUNG, SINHYEON, SINJEONG, SINPYEONG, SIRYE, SONGJEONG, SONGSAN, SUAM, SUBUG, SUGYE, TAEAN, TAEHWA, TAESAN, TEUGGOG, TONGCHEON, UGOG, UJI, ULSAN, UNBONG, UNGOG, UNGYO, UPYEONG, WANGSAN, WANSAN, WEOLGOG, WEOLJEONG, WEOLPYEONG, WEONGOG, WEONJI, YANGGOG, YECHEON, YEGOG, YEONCHEON, YEONDAE, YEONGDONG, YEONGIL, YEONGOG, YEONGRAG, YEONGSAN, YEONGWEOL, YEOSU, YESAN, YONGDANG, YONGGANG, YONGGOG, YONGGYE, YONGHEUNG, YONGJI, YONGSU, YUGA, YUGOG, YUGYE, YUHA, YUHYEON, YULGOG, YULPO, YUWEON, INCHANG, INDONG, INGA, INGOG, INGWAN, INJI, INSAENG, INWOL, SUSAN, GEUGRAG, NAMYANG
Extra (2 series, 0.003%)	IHO, YONGHO

Table 6. SOCref of South Korea compared with IPCC default (0-30 cm).

Soil type (IPCC)	No. of soil series	Mean	SD	Min	Max	CI (95%)	IPCC default
Sandy	30	19.7	12.6	3.8	49.5	4.5	34
LAC (Low Activity Clay)	321	37.6	19.6	4.6	135.2	2.1	63
HAC (High Activity Clay)	7	39.1	21.9	9.5	78.9	16.2	88
Volcanic	45	127.8	56.1	9.8	224.2	16.4	80

Table 7. Total Soil Organic Carbon storage in South Korea.

Soil type (IPCC)	Area (ha)	SOCref	C (Mg)	SUM
Sandy	161586	19.7	3,183,244	385,912,267 Mg C (≅ 386 megaton)
LAC (Low Activity Clay)	9634944	37.6	362,273,894	
HAC (High Activity Clay)	80291	39.1	3,139,378	
Volcanic	135491	127.8	17,315,749	

IPCC 기본값과 비교할 때 Sandy 형과 LAC 형은 낮은 값을 보여주었고, HAC형 토양은 비슷하였다. 그러나 Volcanic soil은 IPCC와 비교하여 상당히 높은 값을 보였는데 이 값은 IPCC가 제공하는 열대 다습기후의 화산회토 인용 값과 비슷하였다. HAC 형의 95% 신뢰수준이 가장 컸는데 이는 두 개의 유기질 토양을 포함함으로써 최솟값과의 편차가 커졌고 분류된 토양통 개수가 13개 불과 했기 때문인 것으로 사료된다.

국가 고유계수를 적용하여 우리나라 면적에 비례한 탄소 저장량을 산정하면 약 395 Mt (Megaton)이 되는 것을 알 수 있다 (Table 7). Hong (2010) 등은 우리나라 토양 1 m 깊이의 탄소 저장량을 산림, 논, 밭, 초지별로 각각 249 Gg, 102, 56, 16 이라 하였고 총량은 423 Gg 이라고 하였는데 이러한 선행 연구와 비교하여 본연구의 결과 값이 적은 이유는 적용된 토양 데이터의 깊이가 다르고 자갈함량 추정방식에 차이가 있었기 때문인 것으로 판단된다.

Conclusions

IPCC가 제시하는 4가지 토양 분류 기준을 적용하여 산정한 우리나라 SOCref 값은 Sandy, LAC, HAC, Volcanic 형으로 그 값은 각각 19.7 ± 4.5 , 37.6 ± 2.1 , 39.1 ± 16.2 , 127.8 ± 18.1 t C ha⁻¹이었다. IPCC의 기본 값과 비교했을 때 Sandy, LAC 형은 현저히 낮았고 HAC 형은 비슷한 반면, Volcanic 형 토양은 높은 값을 나타냈다. 여기에 면적을 적용해 LULUCF 상에서의 온실가스 배출량을 계산하면 토양탄소 축적변화량에 따른 이산화탄소 배출량이 감소할 것으로 예상된다. 토양도를 기준으로 우리나라 전체 면적 (1001만 ha)에 존재하는 토양유기탄소는 약 386 Mt (Megaton)으로 계산되었고, ha 당 평균 함량은 45 Mg C ha⁻¹이었다. 이들의 평균인 1,300 Pg (10¹⁵)을 적용하였을 때 우리나라 가지고 있는 토양탄소의 함량은 약 0.03%에 해당된다. 우리나라의 전체 면적은 1001만 ha로 전 지구 육지면적의 0.065%를 차지하므로 우리나라의 탄소함량은 이전 연구에서 예측한 전 세계 평균함량에 조금 못 미치는 것을 알 수 있다.

본 연구에서 산정된 국내 토양 종류에 따른 탄소 함량 및 국가탄소 저장량 산정에는 몇 가지 한계가 존재한다. 먼저, 시군별로 조사된 자료이므로 조사자의 견해 및 실험실의 분석 오차로 인해 데이터의 일관성이 부족할 수 있다. 또한

토양층위별 용적밀도와 자갈함량의 추정에 따른 오차, 기후조건과 토지이용 등을 고려하지 않았다는 점은 추후의 연구에서 보완해야 할 점으로 보인다. 그럼에도 불구하고 많은 샘플링 수의 토양 프로파일 데이터를 활용하여 층위별로 표준화하였고 토양형 분류를 통해 토양 종류별 carbon density와 국가 탄소 저장량을 산정한 결과는 추후 토양탄소량 산정 및 변화량 연구에 기초가 될 것으로 기대한다.

Acknowledgement

This study was supported by research project of National Institute of Agricultural Science (PJ00934801), Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

- Adams, W.A. 1973. The effect of organic matter on the bulk and true densities of some uncultivated podzolic soil. *J. Soil Sci.* 24:10-17.
- Batjes, N.H. 1996. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *Eur. J. Soil Sci.* 47(2): 151-163.
- Bishop, T.F.A., A.B. Mcbratnet, and G.M. Laslett. 1999. Modelling soil attribute depth functions with equal- area quadratic smoothing splines. *Geoderma.* 91:27-45.
- Eswaran, H., E. Vandenberg, and P. Reich. 1993. Organic-carbon in soils of the world. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57(1): 192-194.
- Hong, S.Y., Y.S. Zhang, Y.H. Kim, and M.S. Kim. 2010. A study on estimating soil carbon storage in asian countries and Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 42(4):148-149.
- IPCC. 1996. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories.
- IPCC. 2000. Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. Penman J., Kruger D., Galbally I., Hiraishi T., Nyenzi B., Emmanuel S., Buendia L., Hoppaus R., Martinsen T., Meijer J., Miwa K., Tanabe K. (Eds). IPCC/OECD/IEA/IGES. Hayama, Japan.
- IPCC. 2003. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. Penman J., Gytarsky M., Hiraishi T., Krug T., Kruger D., Pipatti R., Buendia L., Miwa K., Ngara T., Tanabe K., Wagner F. (Eds). IPCC/IGES, Hayama, Japan.
- IPCC. 2006. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories.
- Korean Statistical Information Service. 2016. Investigation of agricultural area of Korea (1970-2014). <http://Kosis.kr/>
- Malone, B.P., A.B. McBratney, B. Minasny, and G.M. Laslett. 2009. Mapping continuous depth functions of soil carbon storage and available water capacity. *Geoderma.* 154:135-152.
- Ministry of Environment Greenhouse Gas Inventory and Research Center (GIR), 2017. National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea (NIR).
- National Academy of Agricultural Sciences. 2011. Taxonomical classification of Korean soils. RDA, Suwon, Korea.
- Rawls, W.J. 1983. Estimating soil bulk density from particle size analysis and organic matter content. *Soil Sci.* 135: 123-125.
- Tempel, P., N.G. Batjes, and V.W.P. van Engelen. 1996. IGDP-DIS soil data set for pedotransfer function development. Wageningen.