



토양 특성을 이용한 토양유기탄소저장량 산정 모형 개발

Development of Soil Organic Carbon Storage Estimation Model Using Soil Characteristics

이태화^a · 김상우^b · 신용철^c · 정영훈^d · 임경재^e · 양재익^f · 장원석^{g,†}

Lee Taehwa · Kim Sangwoo · Shin Yongchul · Jung Younghun · Lim Kyoung-Jae · Yang Jae E · Jang Won Seok

ABSTRACT

Carbon dioxide is one of the major driving forces causing climate changes, and many countries have been trying to reduce carbon dioxide emissions from various sources. Soil stores more carbon dioxide(two to three times) amounts than atmosphere indicating that soil organic carbon emission management are a pivotal issue. In this study, we developed a Soil Organic Carbon(SOC) storage estimation model to predict SOC storage amounts in soils. Also, SOC storage values were assessed based on the carbon emission price provided from Republic Of Korea(ROK). Here, the SOC model calculated the soil hydraulic properties based on the soil physical and chemical information. Base on the calculated the soil hydraulic properties and the soil physical · chemical information, SOC storage amounts were estimated. In validation, the estimated SOC storage amounts were 486,696 tons(3.526 kg/m²) in Jindo-gun and shown similarly compared to the previous literature review. These results supported the robustness of our SOC model in estimating SOC storage amounts. The total SOC storage amount in ROK was 305 Mt, and the SOC amount at Gyeongsangbuk-do were relatively higher than other regions. But the SOC storage amount(per unit) was highest in Jeju island indicating that volcanic ashes might influence on the relatively higher SOC amount. Based on these results, the SOC storage value was shown as 8.4 trillion won in ROK. Even though our SOC model was not fully validated due to lacks of measured SOC data, our approach can be useful for policy-makers in reducing soil organic carbon emission from soils against climate changes.

Keywords: Soil hydraulic properties; soil physical · chemical information; soil organic carbon storage; soil organic carbon storage values

1. 서 론

최근 지구온난화로 인한 온실가스 관리문제가 전세계적으로 가장 큰 문제가 되고 있다. 현재와 같은 추세로 온실가스가 증가(RCP8.5)할 경우에 2,100년에는 지구의 평균기온이

3.7°C(2.6~4.8) 및 해수면은 0.63 m(0.45~0.82) 정도 상승할 것으로 추정된다(IPCC, 2014). 육상 생태계에서 가장 큰 탄소 저장고인 토양은 대기 중 이산화탄소(CO₂)를 토양유기탄소로 전환하여 쉽게 방출되지 않고 토양 내에 보존하는 역할을 한다. 하지만 도시화로 인한 토양의 이용 변화 및 산림의 파괴, 인위적 · 자연적 토양의 교란, 온도 상승 등으로 인하여 많은 양의 탄소가 토양으로부터 대기로 방출되고 있으며, 이와 더불어 화석 연료 사용에 의하여 대기중의 CO₂ 농도가 증가하고 있다. 우리나라는 교토의정서에 따라 온실가스를 줄이기 위한 감축의무로 조림사업, 온실가스규제, 탄소배출권제도 등을 시행하고 있다. 2015년부터 시행되고 있는 탄소배출권제도는 CO₂를 배출할 수 있게 하는 권리로 배출권거래제에 의하여 유럽, 미국, 일본, 호주 등 다양한 거래시장에서 거래되고 있다. 우리나라 탄소배출권 거래 가격은 한국거래소에서 2015년 톤(ton)당 7,860원(Kim et al., 2016)에서 시작하여 2019년 6월 현재 톤당 27,500원으로 지속적으로 증가하고 있다.

토양탄소는 고체 또는 수용액 속에 유기물 · 무기물 형태로 토양에 저장되어 있는 탄소를 의미한다. 토양은 대기 중의 탄소 총량(약 800 Gt)의 2.9배, 생물탄소 총량(약 550 Gt)의 4.2배의 탄소를 저장하고 있으며(약 2,300 Gt)(U.S. DOE.,

^a PhD Student, Department of Agricultural Civil Engineering, Kyungpook National University

^b MS Student, Department of Agricultural Civil Engineering, Kyungpook National University

^c Professor, Department of Agricultural Civil Engineering, Kyungpook National University

^d Professor, Department of Construction & Disaster Prevention Engineering, Kyungpook National University

^e Professor, Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University

^f Professor, Department of Biological Environment, Kangwon National University

^g SILC Fellow (PhD), Sustainability Innovation Lab at Colorado (SILC), University of Colorado at Boulder

[†] Corresponding author

Tel.: +1-303-735-7439 Fax: +1-303-492-6187

E-mail: won.jang@colorado.edu

Received: September 25, 2019

Revised: October 15, 2019

Accepted: October 15, 2019

2008), 식물의 광합성작용으로 대기 중의 CO₂를 흡수하여 토양 유기물 형태로 토양에 저장된다. 토양 내 유기탄소는 질소, 인 등의 양분을 포함하고 있기 때문에 화학비료 절감 및 작물 생육 증진 등의 효과를 얻을 수 있다.

토양의 탄소저장은 화석 연료의 연소로 인한 대기 중 CO₂ 증가를 상쇄시킬 수 있는 중요한 수단이다. 하지만 토양의 무분별한 관리와 개발로 인하여 토양에서의 탄소배출이 매년 증가 (Tubiello et al., 2014)하고 있어 이로 인한 경제적인 피해를 수치적으로 표현하는 가치평가가 필요하다. 이러한 가치평가는 보존 실패시 손실되는 자연자산의 가치를 수치적으로 확인할 수 있기 때문에 다른 자원의 가치와 쉽게 비교할 수 있는 장점이 있다 (Costanza et al., 1997). 최근 탄소와 같은 비경제적 재화에 대하여 가치를 평가한 연구가 진행되어 왔다. 토양탄소의 경제적 가치평가를 위해서는 토양내의 토양탄소가 얼마나 저장되어 있는지 확인하는 것이 필요하다. 토양 탄소 저장량을 산정하기 위해서는 다양한 방법들이 사용된다. 국제기후변화협약 (IPCC)의 우수실행지침 (GPG-LULUCF)에는 토양 내 탄소를 측정하기 위하여 한 조사구역에서 2~4회 반복, 최소 조사 깊이를 30 cm로 시료를 채취하여 토양 내 탄소를 측정하도록 하고 있다 (IPCC, 2003). 또한 채취한 토양층 시료를 분석하여 토양층의 탄소저장량, 유기물층의 탄소 저장량, 고사목 탄소저장량을 계산한다. 하지만 이러한 경우 현장조사가 필수적이어서 많은 시간과 비용이 소모된다. 농촌진흥청의 토양정보 시스템의 경우 토양의 물리적 (모래, 이토, 점토, 용적밀도 등) · 화학적 (유기물 함량, 유기탄소 등) 특성만을 제공하기 때문에 토양내의 토양탄소저장량을 산정하기 어려운 실정이다. 따라서 본 연구에서는 토양의 물리

적 · 화학적 특성을 이용하여 토양의 토양유기탄소저장량 산정모형을 개발하였다. 본 연구에서는 1) 토양유기탄소저장량 산정 모형 개발, 2) 우리나라의 토양유기탄소저장량 산정 및 3) 토양유기탄소 저장량 가치평가를 실시하였다.

II. 재료 및 연구방법

본 연구에서는 토양의 유기탄소저장량 산정을 위하여 토양유기탄소저장량 산정모형을 개발하였다. 토양의 유기탄소 저장량을 산정하기 위하여 농촌진흥청의 토양정보시스템의 토양정보 DB (Database)를 이용하였다. 토양정보 DB는 휴전선 부근, 신간척지 등의 일부지역을 제외한 전국토의 96.6%의 토양을 조사하여 토양통별로 토양의 물리적 특성과 화학적 특성을 제공하고 있다 (National Institute of Agricultural Science and Technology-NIAST, 2000). 토양유기탄소저장량 산정모형은 토양의 물리적 · 화학적 특성을 이용하여 토양의 수리학적 매개변수와 유기탄소 저장량을 산정한다. 여기서 모형의 입력자료인 토양의 물리적 특성은 모래 (Sand), 이토 (Silt), 점토 (Clay), 자갈함량 (Gravel)을 나타내며, 토양의 화학적 특성은 유기물 함량 (Organic Matter, OM)을 나타낸다. 토양통에서 제공되는 토양의 물리적 및 화학적 특성을 이용하여 토양의 수리학적 매개변수인 용적밀도 (Bulk Density, BD), 위조점 (Wilting Point, WP), 포장용수량 (Field Capacity, FC) 및 포화 상태의 토양수분 (Saturated Soil Moisture, SSM), 포화 상태의 수리전도도 (Saturated Hydraulic Conductivity, K_{sat})를 산정한다. 유기탄소는 선행연구 (NIAST, 2010)에서 제

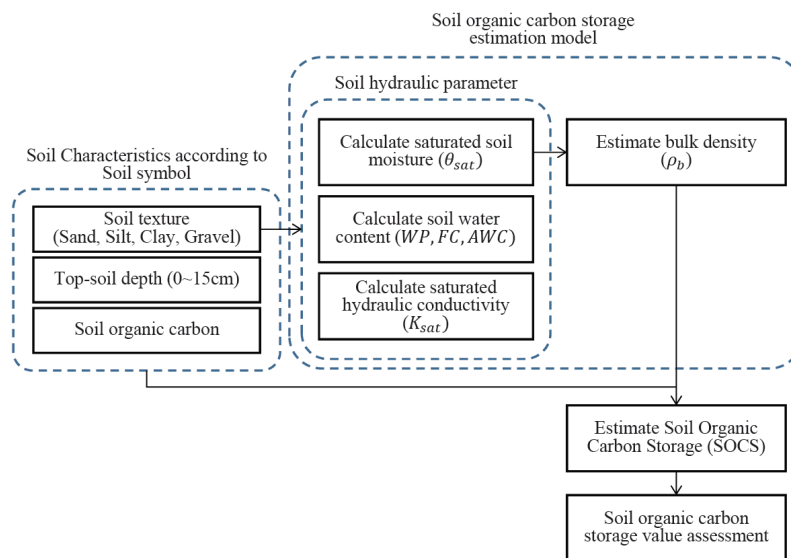


Fig. 1 Flowchart of soil organic carbon storage estimation model

시한 유기물 함량의 58%로 가정하였다. 토양의 물리적·화학적 특성, 산정된 수리학적 매개변수 및 유기탄소를 이용하여 토양유기탄소저장량을 산정하며, Fig. 1은 모식도를 나타낸다. 토양유기탄소저장량을 산정한 이후 현재 탄소 배출 거래권을 이용하여 우리나라의 토양유기탄소저장량 가치평가를 수행하였다.

1. 토양유기탄소저장량 산정모형

토양 유기탄소저장량 산정모형은 토양의 물리적 특성을 이용하여 토양의 수리학적 매개변수를 산정한다. 토양의 용적 밀도는 실제 토양에서 토양내의 수분을 증발시킨 후 측정된 밀도를 의미한다. 각 토심별 시료의 건조중량 (2 mm 체를 통과한 토양)을 토양시료의 부피로 나누어 계산한다. 이러한 토양의 용적밀도는 공기의 흐름, 물의 저장능력 등 작물의 생육 상태 이해의 기준이 된다. 토양의 용적밀도는 토양의 다짐 정도와 공극에 영향을 받기 때문에, 공극이 커지면 용적밀도는 낮아지고 다짐이 커질수록 용적밀도는 높아진다. 또한 용적 밀도는 토양내의 유기물함량과 관련이 높으며, 토양의 공극이 크면 클수록 토양의 통기성 및 수분함량이 높아지기 때문에 토양내의 미생물의 번식이 증가하게 된다. 미생물은 동식물의 사체를 분해하며, 이로 인해 토양내의 유기물 함량이 증가하게 된다. 따라서 용적밀도는 토양내의 유기물함량, 공극, 다짐 등과 밀접하게 관련되어 있다. Saxton et al. (1986)는 토양의 물리적 특성을 이용하여 용적밀도를 계산하는 회귀식을 개발하였으며, 과학기술부 (Ministry of Science and Technology-MST, 2006)는 유기물함량을 이용하여 용적밀도의 추정식을 개발하였다. 공식 1은 과학기술부에서 제시한 용적밀도 추정 공식을 나타낸다.

$$\rho_b = 1.3863 \times e^{-0.0446 \times OM} \quad (1)$$

여기서 ρ_b 는 용적밀도 (Bulk Density, g/cm³) 및 OM은 유기물 함량 (%)을 의미한다.

Saxton et al. (1986)이 제시한 공식은 CENTURY 모형에서 보정하여, 다음과 같은 수정된 회귀식을 이용하여 토양의 수리학적 매개변수 (위조점, 포장용수량, 포화 상태의 토양수분, 포화 상태의 수리전도도 및 용적밀도)를 산정한다 (공식 2-8).

$$A = \exp[-4.396 - 0.0715(\%clay) - 4.880 \times 10^{-4}(\%sand)^2 - 4.285 \times 10^{-5}(\%sand)^2(\%clay)] \times 100.0 \quad (2)$$

$$B = -3.140 - 0.00222(\%clay)^2 - 3.484 \times 10^{-5}(\%sand)^2(\%clay) \quad (3)$$

$$WP_{raw} = (15.0/A)^{1/B} \quad (4)$$

$$FC_{raw} = (0.333/A)^{1/B} \quad (5)$$

$$\theta_{sat} = 0.332 - 7.251 \times 10^{-4}(\%sand) + 0.1276 \log_{10}(\%clay) \quad (6)$$

$$K_{sat} = \exp(12.012 - 0.0755 \times (\%sand) + (-3.895 + 0.03671 \times (\%sand) - 0.1103 \times (\%clay) + 8.7546 \times 10^{-4} \times (\%clay)^2) / \theta_{sat}) \quad (7)$$

$$\rho_N = (1 - \theta_{sat}) \times 2.65 \quad (8)$$

$$WP = 0.85 \times WP_{raw} \quad (9)$$

$$FC = 1.07 \times FC_{raw} \quad (10)$$

$$K_{sat} = K_{sat} / 1500 \quad (11)$$

$$\rho_b = 0.92 \times \rho_N \quad (12)$$

여기서 A, B는 수분장력계수 (Coefficients of Moisture-Tension), %clay, %sand는 점토와 모래함량, WP_{raw} 는 위조점 (Wilting Point, %), FC_{raw} 는 포장용수량 (Field Capacity, %), θ_{sat} 은 포화된 토양수분 (cm³/cm³), K_{sat} 은 포화 수리전도도 (Saturated Hydraulic Conductivity, mm/hr) 및 ρ_N 용적밀도 (Bulk Density, g/cm³)을 나타내며, WP_{raw} , FC_{raw} , θ_{sat} , K_{sat} 및 ρ_N 은 경험식 (공식 9-12)을 이용하여 각각 보정된 WP , FC , K_{sat} 및 ρ_b 를 토양유기탄소저장량 산정모형에서 사용하였다.

토양정보시스템의 토양정보 DB는 우리나라의 토양을 총 405개의 토양통으로 분류하여 토양의 물리적·화학적 특성을 제공한다. 또한 토양통, 표토의 자갈함량 및 표토의 토성의 경우 1:25,000 정밀토양도를 제공하고 있다. 본 연구에서는 이러한 토양정보 DB를 이용하여 각 토양통의 유기탄소저장량을 산정하고 이를 정밀토양도에 적용하여 우리나라의 토양유기탄소저장량을 산정하였다. 표토의 깊이는 일반적으로 0~30 cm로 가정하고 있으나, 실제 토양통의 DB에서는 실측된 토양의 물리적 및 화학적 특성의 관측 깊이가 0~15 cm 혹은 0~30 cm로 토양통 별로 다르게 관측되었기 때문에 본 연구에서는 우리나라 전체의 토양유기탄소저장량을 산정하기 위하여 토양 깊이를 0-15 cm로 가정하였다. Yang et al. (2007)은 토양의 유기탄소 저장량산정 공식을 아래와 같이 제시하였다 (공식 13).

$$SOCS = SOC \times \rho_b \times d \times (1 - \%gravel/100) \quad (13)$$

여기서 SOCS는 토양유기탄소저장량 (Soil Organic Carbon Storage, kg/m²), SOC는 토양의 유기탄소 (Soil Organic

Carbon, g/100g), ρ_b 는 용적밀도 (Bulk Density, g/cm³), d는 토양깊이 (cm) 및 %gravel은 자갈함량 (%)을 의미한다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^I (x_i - x_{sim,i})^2}{I}} \quad (15)$$

2. 시험유역 선정 및 모형 검증

모형의 검증을 위하여 전라남도 진도군을 선정하였다 (Fig. 2). 국내에는 모형 검증을 위한 공간적으로 분포되어 있는 토양의 유기탄소 저장량 실측자료에 관한 연구가 미흡하기 때문에 선행연구 자료를 이용하여 검증을 실시하였다. Jung (2018)은 전라남도 진도군의 토양자료와 정규식생지수 (Normalized Difference Vegetation Index-NDVI), 30 m 수치고도모형 (DEM-Digital Elevation Model), 토지이용도 등의 환경변수들을 이용하여 토양탄소저장량을 산정하였다. 본 연구에서는 해당 연구자료를 바탕으로 하여 토양의 유기탄소저장량 산정 모형의 검증을 실시하였다.

산정된 토양유기탄소저장량은 토양의 물리적·화학적 특성 및 수리학적 매개변수와 상관성을 분석하여, 토양 특성과 수리학적 매개변수가 유기탄소저장량에 미치는 영향을 분석하였다. 상관성분석을 위하여 Pearson 상관계수 (R) 및 RMSE (Root mean square error)를 사용하였으며, 공식 (14-15)와 같다.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^I (SOCs_i - \overline{SOCs_i})(x_{sim,i} - \bar{x}_{sim,i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^I (SOCs_i - \overline{SOCs_i})^2 \sum_{i=1}^I (x_{sim,i} - \bar{x}_{sim,i})^2}} \quad (14)$$

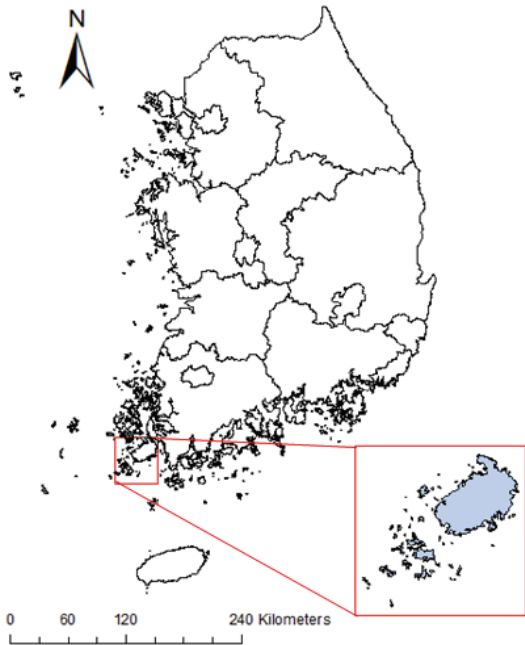


Fig. 2 Study area in Jindo-gun for validation of the soil organic carbon storage estimation model

여기서 $SOCs_i$ 는 단위면적당 토양유기탄소저장량 (kg/m²), $\overline{SOCs_i}$ 는 전체 토양통의 단위면적당 토양유기탄소저장량의 평균 (kg/m²), $x_{sim,i}$ 는 상관성분석에 사용된 모의된 매개변수, $\bar{x}_{sim,i}$ 는 상관성분석에 사용된 각각의 모의된 매개변수 평균, x_i 는 상관성분석에 사용된 매개변수 실측값 (용적밀도), 및 I 는 전체 토양통 갯수이다.

3. 토양탄소 저장량의 가치평가

토양탄소 저장량의 가치를 평가하기 위하여 한국거래소의 탄소배출권 가격을 이용하였다. 유럽은 세계최초로 배출권거래제 (EU ETS)를 2005년부터 시행하고 있으며, 현재 유럽지역 온실가스 배출의 약 45%를 규제하고 있다. 미국의 캘리포니아주 또한 2006년부터 탄소배출권거래제를 시행하고 있으며, 2018년 기준 총 39개 국가에서 시행되고 있다. 우리나라 또한 기후변화 대응을 위한 교토의정서에 따라 2015년 탄소배출권 거래제도를 시행하면서 1차 이행연도 (2015년) 배출권 수량은 약 1,100만톤의 거래가 이루어 졌으며, 총 거래 금액은 약 1,700억원으로 나타났다. 탄소배출권 가격은 수요와 공급에 따라 결정되며, 매년 평균 거래 가격이 상승하고 있다. 본 연구에서는 2019년 상반기 평균 탄소배출권 거래가격 (27,500원/톤)을 기준으로 탄소 저장량 가치를 산정하였으며, 공식은 다음과 같다.

$$\text{토양탄소 저장량의 가치} = \text{총 토양탄소 저장량(톤)} \times \text{탄소 거래가격} \quad (16)$$

III. 결과 및 고찰

1. 토양유기탄소저장량 산정모형 검증

토양의 물리적·화학적 특성 기반 토양유기탄소저장량 산정을 위하여, 농촌진흥청에서 제공하는 실측기반 용적밀도와 회귀식을 통하여 산정된 용적밀도를 비교하였으며, 결과는 Table 1과 같다. 과학기술부의 유기물함량을 이용한 용적밀도 추정식의 경우 상관계수 (R)가 0.808 및 RMSE가 0.168로 나타났으며, CENTURY 회귀식의 경우 상관계수 (R)가 0.270 및 RMSE가 0.320으로 2007년 과학기술부에서 제시한 회귀식이 CENTURY에서 제시된 회귀식과 비교하여 상관성 및 정확도가 상대적으로 높게 나타났다. CENTURY 기반 회귀식의 경우 국외의 환경 (토양, 작물, 기상 등)에서 도출되었으나,

Table 1 Statistics of the measured and estimated (CENTURY and MST) bulk density values

	Measurement	CENTURY	MST (2007)
Average	1,101	1,277	1,139
Median	1,145	1,249	1,223
Maximum	1,640	1,673	1,379
Minimum	0,130	1,084	0,002
R	–	0,270	0,808
RMSE	–	0,320	0,168

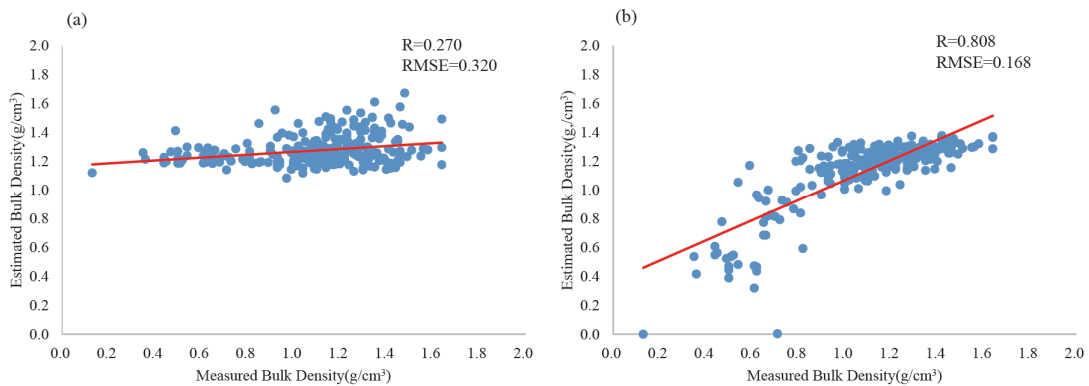


Fig. 3 Comparison of the measured and CENTURY-/MST-based bulk density values

Table 2 Validation of the soil organic carbon storage estimation model at Agricultural areas in Jindo-Gun

Agricultural area (km ²)	Literature Review (Jeong, 2018)		Soil Organic Carbon Storage Estimation Model	
	Soil Organic Carbon Storage (t)	Soil Organic Carbon Storage (t/m ²)	Soil Organic Carbon Storage (t)	Soil Organic Carbon Storage (t/m ²)
138,88	492,230	3,544	489,696	3,526

과학기술부에서 제시한 회귀식의 경우 국내 자료를 기반으로 도출되었기 때문에 국내 자료를 사용한 연구결과에서 상대적으로 상관성이 높고 불확실성 역시 낮은 것으로 판단되었다. CENTURY 회귀식의 경우 과학기술부에서 제시한 용적밀도 추정식보다 일부토양의 용적밀도가 과대산정되는 경향이 나타났다 (Fig. 3). 따라서 본 연구에서는 과학기술부 (2007)에서 제시한 용적밀도 추정식을 토양유기탄소저장량 산정모형에 적용하여 탄소저장량 산정 및 가치평가를 수행하였다.

선행연구 (Jung, 2018)를 이용하여 토양유기탄소저장량 산정모형 결과를 비교·검증하였다. Jung (2018)은 농경지를 대상으로 토양유기탄소저장량을 산정한 결과 탄소 저장량을 492,230 톤으로 산정되었으며, 본 연구에서 산정된 토양유기탄소저장량 역시 489,696 톤으로 유사한 결과가 나타났다. 단위 면적당 토양유기탄소저장량의 경우 선행연구에서 3.544 kg/m²로 나타났으며, 본 연구에서는 3.526 kg/m²으로 선행연구와 매우 유사한 값을 보였다 (Table 2). 본 연구와 선행연구의

토양탄소 저장량 산정에 있어 약 2,500 톤의 차이를 나타내었는데, 이는 토양탄소 저장량 산정에 사용된 용적밀도와 자갈 함량의 차이에 따른 것으로 판단되었다. 비록 직접적인 검증은 토양유기탄소저장량 실측값의 부재로 수행하지 못하였으나, 선행연구와의 비교·검증을 통하여 본 연구에서 제시한 토양유기탄소저장량 산정모형의 적용성을 입증하였다.

Fig. 4는 토양유기탄소저장량과 토양의 수리학적 매개변수 및 물리적·화학적 특성과의 상관성 결과를 나타낸다. 상관성 분석에 사용된 매개변수는 자갈, 모래, 점토, 유기물의 함량, 포장용수량 (FC-Field Capacity), 위조점 (WP-Wilting point), 유효수분함량 (AWC-Available Water Content), 포화 상태의 토양수분 (θ_{sat}), 포화 상태의 수리전도도 (K_{sat}), 용적밀도 (ρ_b) 및 DEM (Digital Elevation Model, 30 m×30 m)을 사용하였다. 토양통별 토양유기탄소저장량과 매개변수 사이의 상관성을 분석하였다. 상관성이 가장 높게 나타난 것은 용적밀도, 모래, 미사, 포화 상태의 토양수분, 유기물함량 순으로 나타났으며, 용적밀

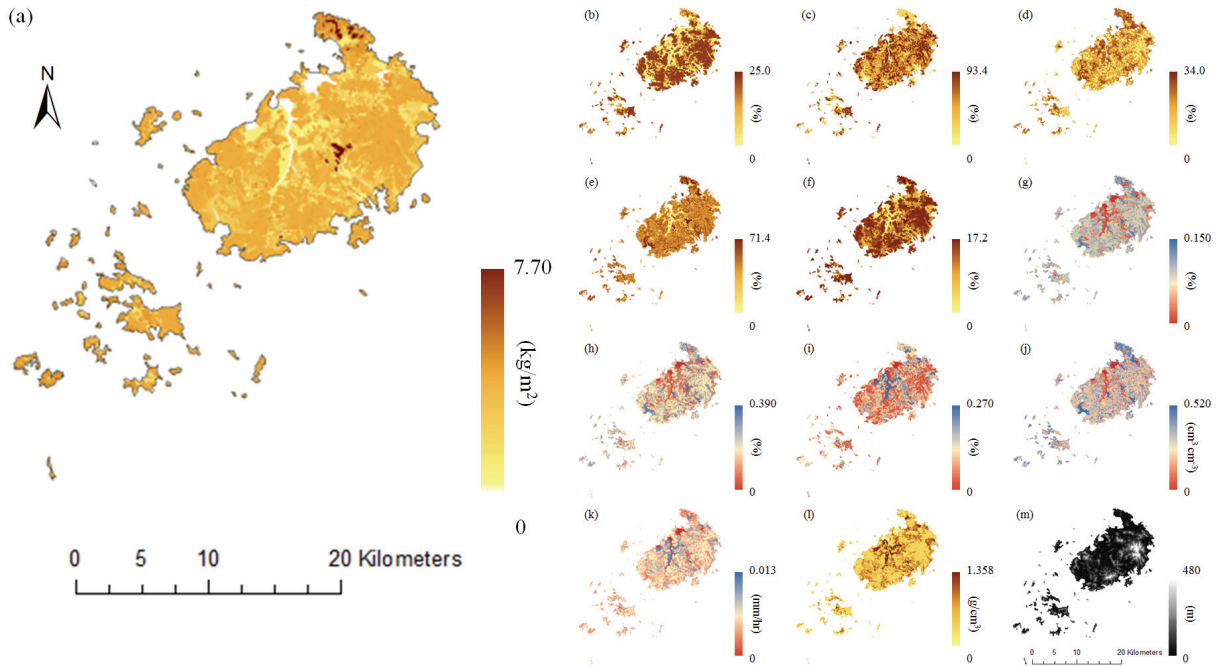


Fig. 4 (a) Spatial distribution of the estimated soil organic carbon storage, (b) Gravel, (c) Sand, (d) Silt, (e) Clay, (f) Organic matter, (g) Wilting point, (h) Field capacity, (i) Available water content, (j) Saturated soil moisture, (k) Saturated hydraulic conductivity, (l) Bulk density, (m) Digital elevation model in Jindo-Gun

Table 3 Correlation between the estimated soil organic carbon storage and the soil (physical · chemical properties and hydraulic properties) information/DEM

	Gravel (%)	Sand (%)	Clay (%)	Silt (%)	OM (%)	WP (%)	FC (%)	AWC (%)	θ_{sat} (cm ³ /cm ³)	K_{sat} (mm/hr)	ρ_b (g/cm ³)	DEM (m)
R	-0.073	-0.426	0.329	0.411	0.354	0.244	0.158	-0.307	0.391	-0.305	-0.840	0.321

도와 모래는 역상관성으로 나타났다 (Table 3). 용적밀도가 높은 토양의 경우 통기성과 통수성이 떨어져 유기물의 분해가 저하되며, 모래함량 역시 값이 높을 경우 공극이 커지기 때문에 토양 통기성이 증가하며 유기물의 부패가 증가하고 대기중으로 빠르게 배출되어 토양유기탄소저장량이 감소하게 된다. 따라서 용적밀도, 모래와 포화수리전도도의 경우 토양탄소 저장량과의 상관성이 역상관성을 보인 것으로 판단되었다.

2. 토양유기탄소저장량 산정 및 가치평가

농촌진흥청에서 제공하는 토양통 DB를 이용하여 토양유기탄소저장량을 산정하였다. 전국 토양탄소 저장량을 산정한 결과 우리나라 전체 토양유기탄소저장량은 305.5 Mt으로 나타났다 (Fig. 5). 행정구역별로는 면적이 가장 넓은 경상북도가 가장 많은 토양탄소를 저장하고 있는 것으로 나타났으며, 면적이 큰 행정구역 순으로 토양탄소를 많이 저장하고 있는

것으로 나타났다. 하지만 단위면적당 탄소 저장량의 경우 제주도가 가장 많은 토양탄소를 저장한 것으로 나타났으며, 울산, 전라남도, 강원도 순으로 토양탄소를 많이 저장하고 있는 것으로 나타났다 (Table 4). 제주도의 경우 화산회토가 존재하여 유기물 함량이 다른 지역보다 높게 나타난 것으로 판단되었다. 유기물 함량의 경우 유기탄소와 밀접한 관계가 있으며, 일반적으로 유기물함량의 약 58%를 유기탄소로 가정한다. 제주도의 대표적인 화산회토인 평대토 (PdB, PdC, PoB, PoC, PoD)의 경우 단위면적당 토양탄소저장량이 9.93 kg/m²으로 토양탄소 저장량이 가장 많은 토양통으로 나타났다.

정밀토양도를 이용하여 산정된 우리나라의 토양탄소저장량 가치는 약 8조 4000억 원인 것으로 추정된다. 한국환경공단은 2019년 5월부터 ETS Insight 라는 국내의 탄소배출권거래 현황 및 탄소배출권 시장분석 결과 등을 담은 정보지를 매월 제공하며, 2019년 2분기 국내 탄소배출권 (KAU, KCU, KOC) 총 거래규모는 7.63 Mt, 거래제도가 시작된 2015년부터

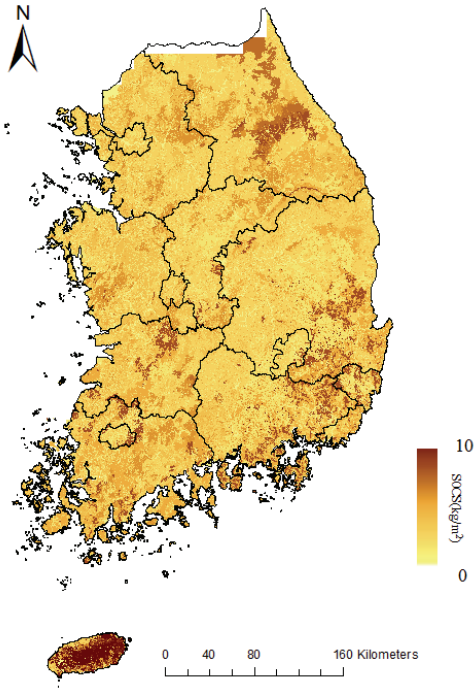


Fig. 5 Spatial distribution of Soil carbon storage in South Korea

2019년 2분기까지 총 거래규모는 102.0 Mt으로 나타났다. 이렇듯 토양은 많은 양의 탄소를 저장하고 있으며 이러한 토양 탄소는 토양관리에 따라 저장량이 변화하게 된다. 무분별한 경운, 토양침식, 지표식생의 감소는 토양내에 저장된 탄소가 대기 중으로 방출하게 되는 원인이 된다. 이러한 부적절한 토양관

리와 토양보존에 실패로 인하여 토양내의 탄소가 대기 중으로 방출하게 된다면 이를 복구하기 위하여 많은 양의 비용과 시간이 필요하게 된다. 따라서 이러한 토양탄소의 대기방출을 막기 위한 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것이며 또한 토양자원의 보전과 관리를 위한 논의가 필요할 것으로 판단된다.

IV. 결 론

토양은 생태계에서 가장 많은 탄소를 저장하고 있는 저장고역할을 한다. 본 연구에서는 이러한 토양유기탄소저장량을 산정하기 위하여 토양유기탄소저장량 산정모형을 개발하였다. 농촌진흥청에서 제공하는 토양DB를 이용하여 수리학적 매개변수와 토양유기탄소저장량을 산정하였으며, 지표인자 및 토양특성과의 상관성을 분석하였다. 모형 검증에 위하여 전라남도 진도군을 대상으로 모형의 비교·검증을 수행하였다. 선행연구를 기반으로 모형 검증을 수행한 결과 선행연구 자료와 유사하게 토양유기탄소저장량이 산정되었으며, 토양유기탄소저장량 산정에 사용된 자갈함량과 용적밀도의 차이로 인하여 약간의 차이가 나타난 것으로 판단되었다. 또한 모형에서 산정한 토양의 수리학적 매개변수, DEM, 및 토양의 물리적·화학적 특성을 이용하여 토양유기탄소저장량과의 상관성을 분석하였다. 상관성의 경우 용적밀도, 모래함량, 점토함량 및 포화수리전도도 순으로 상관성이 높은 것으로 나타났다. 용적밀도와 모래함량의 경우 역상관성을 보였다. 일반적으로 용적밀도가 낮은 토양의 경우 토양의 공극을 통

Table 4 Estimated soil organic carbon storage amounts and value assessment

Provinces	Areas (km ²)	Soil Organic Carbon Storage Amounts (Mt)	Soil Organic Carbon Storage Prices (Won)	Soil Organic Carbon Storage Amounts (kg/m ²)
Seoul	607.69	1.34	36,774,828,095	2.20
Daejeon	540.38	1.47	40,302,204,600	2.71
Gwangju	497.75	1.54	42,413,692,077	3.10
Incheon	780.17	1.92	52,839,926,818	2.46
Daegu	882.54	1.97	54,218,040,238	2.23
Busan	726.60	2.36	64,768,821,340	3.24
Ulsan	1,058.21	4.03	110,699,824,268	3.80
Jeju	1,832.85	13.17	362,167,525,623	7.19
Chungcheonbuk-Do	7,444.72	20.33	558,947,109,456	2.73
Chungcheonnam-Do	8,503.09	23.89	656,920,968,010	2.81
Jeollabuk-Do	7,959.15	25.37	697,663,849,201	3.19
Gyeonggi-Do	10,021.09	27.70	761,807,355,217	2.76
Gyeongsangnam-Do	10,507.73	34.37	945,039,894,229	3.27
Junlanam-Do	11,875.99	40.55	1,115,030,822,553	3.41
Gangwon-Do	15,984.74	52.58	1,445,901,388,212	3.29
Gyeongsangbuk-Do	18,969.66	52.97	1,456,811,706,581	2.79
South Korea	98,192.35	305.54	8,402,307,956,519	3.11

하여 산소와 물의 공급으로 인하여 유기물의 분해가 증가하여 토양내에 유기탄소로 저장되기 때문에, 용적밀도가 높은 경우 토양유기탄소저장량이 낮은 것으로 판단되었다. 산정된 토양유기탄소저장량을 정밀토양도와 연계하여 우리나라의 토양탄소 저장량을 산정한 결과 우리나라 전체 토양탄소 저장량은 305.54 Mt으로 나타났으며, 단위면적당 토양탄소 저장량의 경우 3.11 kg/m²으로 산정되었다. 또한 행정구역별로 토양탄소 저장량을 산정한 결과, 면적이 가장 큰 경상북도의 토양탄소 저장량이 52.97 Mt으로 가장 높게 나타났다. 또한 단위 면적당 토양탄소 저장량의 경우 제주도가 7.19 kg/m²으로 가장 높게 나타났다. 제주도의 경우 화산회토로 인하여 유기물함량이 높고 용적밀도가 낮아 토양탄소 저장량이 높게 나타난 것으로 판단되었다. 우리나라 전체 토양 탄소 저장량의 가치평가 결과 약 8조 4000억원의 경제적 가치가 있는 것으로 추정되었다. 본 연구는 토양탄소 저장량 산정모형을 개발하여 토양탄소 저장량을 산정하고 토양내 저장되어 있는 탄소의 가치평가를 수행하였다. 본 연구결과는 농업, 수문, 기후변화 등 다양한 분야에서 필요로 하는 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 환경부 “표토보전관리기술개발사업; 20190028 20002”으로 지원받은 과제임.

REFERENCES

1. Costanza, R., R. d'Arge, R. de Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Naeem, R. V. O'Neill, J. Paruelo, R. G. Raskin, P. Sutton, and M. van den Belt, 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387: 253-260. doi:10.1038/387253a0.
2. IPCC, 2003. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry, ed. Penman J., M. Gytarsky, T. Hiraishi, T. Krug, D. Kruger, R. Pipatti, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe, and F. Wagner, IPCC/IGES, Japan: Hayama.
3. IPCC, 2014. Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, ed. Core Writing Team, R. K. Pachauri and L. A. Meyer, IPCC, Switzerland: Geneva. 60.
4. Jung, G. Y., 2018. Spatial prediction and economic evaluation of soil carbon stocks using digital soil mapping in an agricultural landscape. *The Geographical Journal of Korea* 52(3): 389-401. (In Korean with English abstract).
5. Kim, G. L., J. M. Yu, and J. T. Kim, 2016. Challenges to stabilizing market prices in Korean emissions trading and policy direction. *Journal of Environmental Policy and Administration* 24(2): 189-210 (In Korean with English abstract). doi:10.15301/jepa.2016.24.2.189.
6. Ministry of Science and Technology (MST), 2006. Technology for integrated basin-wide water budget analysis and water resources planning. Sustainable Water Resources Research Program, The 21st Century Frontier R&D Program (in Korean).
7. National Institute of Agricultural Science and Technology (NIAST), Korea, 2000. Taxonomical classification of Korean soils. National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, 1162-1165.
8. National Institute of Agricultural Science and Technology (NIAST), Korea, 2010. Methods of soil chemical analysis, National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA.
9. Saxton, K. E., W. J. Rawls, S. J. Romberger, and R. I. Papendick, 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Science Society of America Journal* 50: 1031-1036. doi:10.2136/sssaj1986.0361599500500040039x.
10. Tubiello, F. N., M. Salvatore, R. Golec, A. Ferrara, S. Rossi, R. Biancalani, S. Federici, H. Jacobs, and A. Flammini, 2014. Agriculture, forestry and other land use emissions by sources and removals by sinks: 1990-2011 analysis. ESS/14-02, Rome: Statistics Division, Food and Agriculture Organization. doi:10.13140/2.1.4143.4245.
11. US DOE, 2008. Climate placemat: Energy-climate nexus. Report from the March 2008 Workshop, DOE/SC-108, U.S. Department of Energy Office of Science.
12. Yang, Y., A. Mogammat, J. M. Feng, R. Zhou, and J. Y. Fang, 2007. Storage, patterns and environmental controls of soil organic carbon in China. *Biogeochemistry* 84(2): 131-141. doi:10.1007/s10533-007-9109-z.