



(19) 대한민국특허청(KR)  
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2024년09월25일  
(11) 등록번호 10-2710164  
(24) 등록일자 2024년09월23일

- (51) 국제특허분류(Int. Cl.)  
G16C 20/70 (2019.01) G01N 33/24 (2006.01)  
G06Q 50/02 (2024.01) G16C 10/00 (2019.01)
- (52) CPC특허분류  
G16C 20/70 (2019.02)  
G01N 33/24 (2019.01)
- (21) 출원번호 10-2024-0027286  
(22) 출원일자 2024년02월26일  
심사청구일자 2024년02월26일
- (56) 선행기술조사문헌  
M. W. Jordon et al., Modelling soil carbon stocks following reduced tillage intensity: A framework to estimate decomposition rate constant modifiers for RothC-26.3, Soil Tillage Res.(2022)\*  
(뒷면에 계속)

- (73) 특허권자  
경희대학교 산학협력단  
경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732 (서천동, 경희대학교 국제캠퍼스내)
- (72) 발명자  
유가영  
서울특별시 서초구 서운로 200 롯데캐슬 클래식 아파트 115동 101호 (서초동, 롯데캐슬클래식아파트)
- 현준기  
경기도 용인시 처인구 동백죽전대로 80 (삼가동)
- (74) 대리인  
특허법인 아이퍼스

전체 청구항 수 : 총 5 항

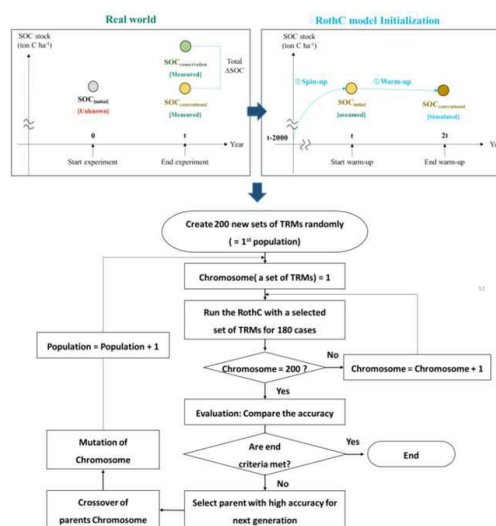
심사관 : 권계민

(54) 발명의 명칭 경운 방법별 토양 유기 탄소 저장 변화량 예측시스템 및 예측방법

(57) 요약

본 발명은 경운 방법별 토양 유기 탄소 저장 변화량 예측시스템 및 예측방법에 관한 것으로, 보다 상세하게는 토양 유기 탄소 저장 변화량 예측시스템으로서, 경운 방법별 토양유기탄소 저장량 변화에 대한 사전 데이터를 수집하는 데이터 수집부; 수집데이터에서 토양유기탄소 변화량을 기반으로 그룹핑하여 분류하고, 보존경운에 따른 토양유기탄소 저장량 변화를 유발하는 주요인자를 분석하는 의사결정나무 분석부; 및 각 그룹별 최적화된 RothC 모델의 TRM을 도출하는 TRM 모수화부;를 포함하는 것을 특징으로 하는 경운 방법별 토양 유기 탄소 저장 변화량 예측시스템에 관한 것이다.

대표도 - 도6



(52) CPC특허분류

G01N 33/245 (2024.05)  
G06Q 50/02 (2024.01)  
G16C 10/00 (2019.02)  
G06F 2219/10 (2013.01)

(56) 선행기술조사문헌

W. Sun et al., Climate drives global soil carbon sequestration and crop yield changes under conservation agriculture, Glob. Change Biol. Vol.26, pp3325-3335(2020)\*  
W. Yu et al., Significant Improvement in Soil Organic Carbon Estimation Using Data-Driven Machine Learning Based on Habitat Patches, Remote Sens. Vol.16, 688(2024.02.15.)\*  
유수홍 외, 의사결정나무를 이용한 토양유기탄소 추정 모델 제작, 한국지형공간정보학회지 제18권 제3호, pp.29-35(2010.09.)\*  
현준기 외, 농업환경 보전 프로그램 중 토양탄소 저장 증진 영농활동의 효과 정량화 방법론, 한국기후변화학회지 제12권 제6호, pp.701-712(2021.12.31.)\*  
\*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

|             |                              |
|-------------|------------------------------|
| 과제고유번호      | 미부여                          |
| 과제번호        | RS-2023-00232066             |
| 부처명         | 환경부                          |
| 과제관리(전문)기관명 | 한국환경산업기술원                    |
| 연구사업명       | 관측기반 온실가스 공간정보지도 구축 기술개발     |
| 연구과제명       | 관측기반 온실가스 공간정보지도 구축 플랫폼 기술개발 |
| 과제수행기관명     | 경희대학교 산학협력단                  |
| 연구기간        | 2023.04.01 ~ 2027.12.31      |
| 공지예외적용      | : 있음                         |

## 명세서

### 청구범위

#### 청구항 1

토양 유기 탄소 저장 변화량 예측시스템으로서,

경운 방법별 토양유기탄소 저장량 변화에 대한 사전 데이터를 수집하는 데이터 수집부; 수집데이터에서 토양유기탄소 변화량을 기반으로 그룹핑하여 분류하고, 보존경운에 따른 토양유기탄소 저장량 변화를 유발하는 주요인자를 분석하는 의사결정나무 분석부; 및 각 그룹별 최적화된 RothC 모델의 TRM을 도출하는 TRM 모수화부;를 포함하고,

상기 데이터 수집부는,

대조구를 관행경운, 처리구를 보존경운으로 하여, 5년이상 및 중위도권에서 수행된 야외 포장시험과 특정 깊이 이상의 토양유기탄소 저장량 변화를 보고한 데이터인지를 기준으로 수집하고, 상기 수집데이터는 각 처리구 별로, 토양유기탄소 저장량과, 위치 정보, 기상 정보, 토지 이용 정보, 토양 정보, 및 농경지 관리 정보를 포함하며, 상기 수집데이터로부터 보존경운 도입으로 토양유기탄소 저장량 변화를 파악하며,

상기 의사결정나무 분석부는,

의사결정나무 분석을 통해 기상과 토양 환경 변수, 및 농경지 관리 방법중 보존경운 효과 및 토양유기탄소 저장 변화량의 지역별 차이를 유발하는 주요인자인 토양의 모래함량(sand content, %)과 대조구의 토양유기탄소 저장량( $\text{ton C ha}^{-1}$ )을 파악하여 토양유기탄소 저장변화량이 유사한 유형 및 지역을 분류하여, 의사결정나무 분석결과 보존경운의 효과가 상이한 복수개의 그룹으로 분류되고,

상기 TRM 모수화부는, 유전 알고리즘(Genetic algorithm)을 통한 TRM 모수화를 진행하며, 훈련용 데이터 세트에 대한 모델 입력자료 데이터 세트 구축하고, 유전 알고리즘 (Genetic algorithm)을 통한 TRM 모수화를 진행하는 것을 특징으로 하는 경운 방법별 토양 유기 탄소 저장 변화량 예측시스템.

#### 청구항 2

삭제

#### 청구항 3

삭제

#### 청구항 4

삭제

#### 청구항 5

삭제

#### 청구항 6

제 1항에 있어서,

의사결정나무 분석의 종속변수는  $\Delta \text{SOC}_R$  ( $\text{ton C ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ )로 하기 수학적 식 3을 통해 계산하는 것을 특징으로 하는 경운 방법별 토양 유기 탄소 저장 변화량 예측시스템:

[수학적 식 3]

$$\Delta SOC_R = \frac{SOC_{conservation} - SOC_{conventional}}{experimental\ duration}$$

상기  $SOC_{conventional}$ 은 관행경운 처리구의 특정 깊이 토양 유기탄소 저장량 ( $ton\ C\ ha^{-1}$ )을 의미하며,  $SOC_{conservation}$ 은 관행경운 처리구 특정 깊이 토양의 중량과 동일한 양의 토양에 저장된 유기탄소의 양을 의미하고,  $experimental\ duration\ (year^{-1})$ 은 총 포장시험 기간을 의미한다.

#### 청구항 7

삭제

#### 청구항 8

삭제

#### 청구항 9

삭제

#### 청구항 10

삭제

#### 청구항 11

제 1항에 따른 경운 방법별 토양 유기 탄소 저장 변화량 예측시스템을 이용한 토양 유기 탄소 저장 변화량 예측 방법으로서,

데이터 수집부가 경운 방법별 토양유기탄소 저장량 변화에 대한 사전 데이터를 수집하는 제1단계;

의사결정나무 분석부가 수집데이터에서 토양유기탄소 변화량을 기반으로 그룹핑하여 분류하고, 보존경운에 따른 토양유기탄소 저장량 변화를 유발하는 주요인자를 분석하는 제2단계;

TRM 모수화부가 각 그룹별 최적화된 RothC 모델의 TRM을 도출하는 제3단계; 및

경운에 따른 변화량을 예측하고자 하는 처리구의 그룹을 결정하고 상기 그룹에 최적화된 TRM을 기반으로 변화량을 예측하는 제4단계;를 포함하고,

상기 제1단계에서,

상기 데이터 수집부는, 대조구를 관행경운, 처리구를 보존경운으로 하여, 5년이상 및 중위도권에서 수행된 야외 포장시험과 특정 깊이 이상의 토양유기탄소 저장량 변화를 보고한 데이터인지를 기준으로 수집하고, 상기 수집 데이터로부터 보존경운 도입으로 토양유기탄소 저장량 변화를 파악하는 것을 특징으로 하는 경운 방법별 토양 유기 탄소 저장 변화량 예측방법.

#### 청구항 12

삭제

#### 청구항 13

제 11항에 있어서,

상기 제2단계는,

의사결정나무 분석을 통해 기상과 토양 환경 변수 및 농경지 관리 방법중 보존경운 효과 및 토양유기탄소 저장 변화량의 지역별 차이를 유발하는 주요인자인 토양의 모래함량(sand content, %)과 대조구의 토양유기탄소 저장

량( $\text{ton C ha}^{-1}$ )를 파악하고, 토양유기탄소 저장변화량이 유사한 유형 및 지역을 분류하며,

의사결정나무 분석의 종속변수는  $\Delta \text{SOC}_R$  ( $\text{ton C ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ )로 하기 수학식 3을 통해 계산하고,

의사결정나무 분석결과, 보존경운의 효과가 상이한 복수개의 그룹으로 분류되는 것을 특징으로 하는 경운 방법별 토양 유기 탄소 저장 변화량 예측방법:

[수학식 3]

$$\Delta \text{SOC}_R = \frac{\text{SOC}_{\text{conservation}} - \text{SOC}_{\text{conventional}}}{\text{experimental duration}}$$

상기  $\text{SOC}_{\text{conventional}}$ 은 관행경운 처리구의 특정 깊이 토양 유기탄소 저장량 ( $\text{ton C ha}^{-1}$ )을 의미하며,  $\text{SOC}_{\text{conservation}}$ 은 관행경운 처리구 특정 깊이 토양의 중량과 동일한 양의 토양에 저장된 유기탄소의 양을 의미하고, experimental duration ( $\text{year}^{-1}$ )은 총 포장시험 기간을 의미한다.

#### 청구항 14

제 13항에 있어서,

상기 제3단계에서,

상기 TRM 모수화부는, 훈련용 데이터 세트에 대한 모델 입력자료 데이터 세트 구축하고, 유전 알고리즘 (Genetic algorithm)을 통한 TRM 모수화를 진행하는 것을 특징으로 하는 경운 방법별 토양 유기 탄소 저장 변화량 예측방법.

#### 청구항 15

삭제

### 발명의 설명

### 기술 분야

[0001] 본 발명은 경운 방법별 토양 유기 탄소 저장 변화량 예측시스템 및 예측방법에 관한 것이다.

### 배경 기술

[0002] 토양은 1m 깊이에서 유기 탄소(C)를 1500-2400 Pg 저장하고 있는데, 이는 식물과 대기의 탄소 합계보다 많은 수준이다(Crowther et al, 2019; FAO, 2022). 하지만, 과거부터 이어진 농업 활동으로 인해 농경지 토양 유기 탄소(SOC)의 25-75%가 손실되었고, 지난 두 세기 동안 손실률이 급격히 증가했다(Lal, 2011; Sanderman et al, 2017). SOC 불안정화와 CO<sub>2</sub> 방출은 SOC-기후 상호작용을 증폭시킬 수 있으며, 이는 기후 변화와 지속 가능한 식량 생산 측면에서 부정적인 영향을 미친다(Jungkunst et al, 2022; Kowalchuk, 2012).

[0003] 대기 중 CO<sub>2</sub>를 장기 토양 C 저장소로 격리시키는 것은 지속 가능한 토양 관리(SSM) 관행을 채택함으로써 달성될 수 있다(Lal, 2021; Paustian et al, 2019). 탄소를 격리시키기 위한 SSM 관행의 주요 원칙은 1) 유기물 입력 증가와 2) SOC 분해 감소이다(Beillouin et al, 2022). 대부분의 SSM 관행은 작물 잔여물 보존, 관개, 그리고 피복 작물과 같은 유기물 입력 증가에 초점을 맞추고 있지만, 보존 경작(무경운 및 부분 경운)은 토양 침식을 방지하고 토양 입단을 보호함으로써 SOC 손실을 감소시킬 수 있다(Lessmann et al, 2022; Paustian et al, 2019; Shalunov et al, 2021; Sun et al, 2020). RothC 모델(Coleman and Jenkinson, 2014)은 토지 사용자와 정책 입안자들이 다양한 SSM 채택에 의한 SOC 변화의 효과를 정량화하기 위해 널리 사용되고 있다(Shirato, 2020). 입력 데이터의 수가 상대적으로 적기 때문에, 국제 기구들도 이를 사용하고 있다(FAO, 2022). 또한, RothC는 영국, 일본, 스위스, 호주 등의 국가에서 Tier 3 수준의 국가 온실가스 인벤토리 구축을 위해 사용되고

있다(Smith et al, 2020). RothC 모델에서, 피복 작물과 관개와 같은 탄소 유입을 증가시키는 SSM 관행은 순 일차 생산 데이터를 변경함으로써 직접 시뮬레이션될 수 있다. 하지만, SOC 분해를 감소시키는 관행의 조건을 명시적으로 나타내지 않아, 보존 경작의 효과를 제대로 시뮬레이션할 수 없다.

- [0004] 이 한계를 극복하여 일부 연구자들은 경운 방법에 대한 SOC 변화를 시뮬레이션하기 위해 RothC 모델의 분해율 상수(decomposition rate constants)에 대한 변수인 경작률 수정자(TRMs, tillage rate modifiers)를 개발했다(Jordon and Smith, 2022; Soja, 2010). Soja (2010)는 오스트리아의 한 농경지에서 장기 실험 데이터로 RothC를 보정하여 무경운에 대한 TRM을 개발했다. 하지만, 그들의 TRM은 하나의 야외 실험 데이터에 한정되어 있어, 지역/국가 규모 평가로 확장하기에는 불충분하다. Jordon and Smith의 (2022) 북서 유럽 지역으로 연구 범위를 확장하여 무경운과 부분 경운에 대한 TRM을 개발했지만, 이는 다른 토양 및 기후 조건의 영향을 충분히 다루지 못했다. 따라서, 보존 경운의 공간적으로 이질적인 효과를 일으키는 주요 변수를 고려하면서 다수의 TRM을 개발할 필요가 있다.

## 선행기술문헌

### 특허문헌

- [0005] (특허문헌 0001) 대한민국 등록특허 10-2180305  
(특허문헌 0002) 대한민국 공개특허 10-2022-0066534  
(특허문헌 0003) 대한민국 공개특허 10-2023-0172080

## 발명의 내용

### 해결하려는 과제

- [0006] 따라서 본 발명은 상기와 같은 종래의 문제점을 해결하기 위하여 안출된 것으로서, 본 발명의 실시예에 따르면, 경운 방법(관행경운 vs 보존경운)에 따른 토양 유기탄소 저장량의 차이를 1km 공간 해상도, 연 단위로 예측할 수 있는, 경운 방법별 토양 유기 탄소 저장 변화량 예측시스템 및 예측방법을 제공하는데 그 목적이 있다.
- [0007] 본 발명의 실시예에 따르면, 기존 전 세계적으로 토양 유기탄소 저장량 예측을 위해 사용되던 RothC 모델에 자료 동화 기법을 적용한 모델 파라미터(Tillage Rate Modifiers, TRM)로 관행경운과 보존경운의 효과를 예측 가능한, 경운 방법별 토양 유기 탄소 저장 변화량 예측시스템 및 예측방법을 제공하는데 그 목적이 있다.
- [0008] 본 발명의 실시예에 따르면, 1) 국가 온실가스 인벤토리 농경지 토양 탄소 저장량 부문의 tier 3 수준 산정에 적용될 수 있고 2) 관행경운을 수행 중인 농지에 대하여, 보존경운 도입의 효과를 사전에 추정하는데 활용될 수 있으며 3) 현장 조사와 결합하여 농경지 토양 탄소 저장 증가량을 측정, 보고, 검증(MRV)하는데 사용됨으로써 자발적 탄소 시장에 발급할 탄소 크레딧의 신뢰도를 높일 수 있는, 경운 방법별 토양 유기 탄소 저장 변화량 예측시스템 및 예측방법을 제공하는데 그 목적이 있다.
- [0009] 그리고 본 발명의 실시예에 따르면, 자발적 탄소 시장 사업자(Verra 등)의 MRV 방법론 개선 또는 신규 방법론 등록에 사용되어 관련 프로젝트를 이끌어낼 수 있는, 경운 방법별 토양 유기 탄소 저장 변화량 예측시스템 및 예측방법을 제공하는데 그 목적이 있다.
- [0010] 한편, 본 발명에서 이루고자 하는 기술적 과제들은 이상에서 언급한 기술적 과제들로 제한되지 않으며, 언급하지 않은 또 다른 기술적 과제들은 아래의 기재로부터 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 명확하게 이해될 수 있을 것이다.

### 과제의 해결 수단

- [0011] 본 발명의 제1목적은 토양 유기 탄소 저장 변화량 예측시스템으로서, 경운 방법별 토양유기탄소 저장량 변화에 대한 사전 데이터를 수집하는 데이터 수집부; 수집데이터에서 토양유기탄소 변화량을 기반으로 그룹핑하여 분류하고, 보존경운에 따른 토양유기탄소 저장량 변화를 유발하는 주요인자를 분석하는 의사결정나무 분석부; 및 각 그룹별 최적화된 RothC 모델의 TRM을 도출하는 TRM 모수화부;를 포함하는 것을 특징으로 하는 경운 방법별 토양 유기 탄소 저장 변화량 예측시스템으로서 달성될 수 있다.

- [0012] 그리고 상기 데이터 수집부는, 대조구를 관행경운, 처리부를 보존경운으로 하여, 5년이상, 중위도권에서 수행된 야외 포장시험, 특정 깊이 이상의 토양유기탄소 저장량 변화를 보고한 데이터인지를 기준으로 수집하는 것을 특징으로 할 수 있다.
- [0013] 또한 상기 수집데이터는 각 처리구 별로, 토양유기탄소 저장량과, 위치 정보, 기상 정보, 토지 이용 정보, 토양 정보, 농경지 관리 정보를 포함하는 것을 특징으로 할 수 있다.
- [0014] 그리고 상기 수집데이터로부터 보존경운 도입으로 토양유기탄소 저장량 변화를 파악하는 것을 특징으로 할 수 있다.
- [0015] 또한 상기 의사결정나무 분석부는, 의사결정나무 분석을 통해 기상 및 토양 환경 변수, 농경지 관리 방법중 보존경운 효과 및 토양유기탄소 저장변화량의 지역별 차이를 유발하는 주요인자를 파악하고, 토양유기탄소 저장변화량이 유사한 유형 및 지역을 분류하는 것을 특징으로 할 수 있다.
- [0016] 그리고 의사결정나무 분석의 종속변수는  $\Delta SOC_R$  ( $\text{ton C ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ )로 하기 수학적 식 3을 통해 계산하는 것을 특징으로 할 수 있다.
- [0017] [수학적 식 3]
- [0018] 
$$\Delta SOC_R = \frac{SOC_{\text{conservation}} - SOC_{\text{conventional}}}{\text{experimental duration}}$$
- [0019] 상기  $SOC_{\text{conventional}}$ 은 관행경운 처리구의 특정 깊이 토양 유기탄소 저장량 ( $\text{ton C ha}^{-1}$ )을 의미하며,  $SOC_{\text{conservation}}$ 은 관행경운 처리구 특정 깊이 토양의 중량과 동일한 양의 토양에 저장된 유기탄소의 양을 의미하고, experimental duration ( $\text{year}^{-1}$ )은 총 포장시험 기간을 의미한다.
- [0020] 또한 의사결정나무 분석결과, 보존경운의 효과가 상이한 복수개의 그룹으로 분류되는 것을 특징으로 할 수 있다.
- [0021] 그리고 보존경운 효과의 지역별 차이를 가져오는 주요인자는 토양의 모래함량(sand content, %)과 대조구의 토양유기탄소 저장량( $\text{ton C ha}^{-1}$ )인 것을 특징으로 할 수 있다.
- [0022] 또한 상기 TRM 모수화부는, 유전 알고리즘(Genetic algorithm)을 통한 TRM 모수화를 진행하는 것을 특징으로 할 수 있다.
- [0023] 그리고 상기 TRM 모수화부는, 훈련용 데이터 세트에 대한 모델 입력자료 데이터 세트 구축하고, 유전 알고리즘(Genetic algorithm)을 통한 TRM 모수화를 진행하는 것을 특징으로 할 수 있다.
- [0024] 본 발명의 제2목적은 토양 유기 탄소 저장 변화량 예측방법으로서, 데이터 수집부가 경운 방법별 토양유기탄소 저장량 변화에 대한 사전 데이터를 수집하는 제1단계; 의사결정나무 분석부가 수집데이터에서 토양유기탄소 변화량을 기반으로 그룹핑하여 분류하고, 보존경운에 따른 토양유기탄소 저장량 변화를 유발하는 주요인자를 분석하는 제2단계; 및 TRM 모수화부가 각 그룹별 최적화된 RothC 모델의 TRM을 도출하는 제3단계; 및 경운에 따른 변화량을 예측하고자 하는 처리구의 그룹을 결정하고 상기 그룹에 최적화된 TRM을 기반으로 변화량을 예측하는 제4단계;를 포함하는 것을 특징으로 하는 경운 방법별 토양 유기 탄소 저장 변화량 예측방법으로서 달성될 수 있다.
- [0025] 그리고 상기 제1단계에서, 상기 데이터 수집부는, 대조구를 관행경운, 처리부를 보존경운으로 하여, 5년이상, 중위도권에서 수행된 야외 포장시험, 특정 깊이 이상의 토양유기탄소 저장량 변화를 보고한 데이터인지를 기준으로 수집하고, 상기 수집데이터로부터 보존경운 도입으로 토양유기탄소 저장량 변화를 파악하는 것을 특징으로 할 수 있다.
- [0026] 또한 상기 제2단계는, 의사결정나무 분석을 통해 기상 및 토양 환경 변수, 농경지 관리 방법중 보존경운 효과 및 토양유기탄소 저장변화량의 지역별 차이를 유발하는 주요인자를 파악하고, 토양유기탄소 저장변화량이 유사한 유형 및 지역을 분류하며, 의사결정나무 분석의 종속변수는  $\Delta SOC_R$  ( $\text{ton C ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ )로 하기 수학적 식 3을 통해 계산하고, 의사결정나무 분석결과, 보존경운의 효과가 상이한 복수개의 그룹으로 분류되며, 보존경운 효과의 지역별 차이를 가져오는 주요인자는 토양의 모래함량(sand content, %)과 대조구의 토양유기탄소 저장량( $\text{ton C}$

$\text{ha}^{-1}$ )인 것을 특징으로 할 수 있다.

[수학식 3]

$$\Delta SOC_R = \frac{SOC_{\text{conservation}} - SOC_{\text{conventional}}}{\text{experimental duration}}$$

상기  $SOC_{\text{conventional}}$ 은 관행경운 처리구의 특정 깊이 토양 유기탄소 저장량 ( $\text{ton C ha}^{-1}$ )을 의미하며,  $SOC_{\text{conservation}}$ 은 관행경운 처리구 특정 깊이 토양의 중량과 동일한 양의 토양에 저장된 유기탄소의 양을 의미하고, experimental duration ( $\text{year}^{-1}$ )은 총 포장시험 기간을 의미한다.

또한 상기 제3단계에서, 상기 TRM 모수화부는, 훈련용 데이터 세트에 대한 모델 입력자료 데이터 세트 구축하고, 유전 알고리즘 (Genetic algorithm)을 통한 TRM 모수화를 진행하는 것을 특징으로 할 수 있다.

본 발명의 제3목적은, 컴퓨터에 의해 관독되어 실행되는 토양 유기 탄소 저장 변화량 예측 프로그램으로서, 경운 방법별 토양유기탄소 저장량 변화에 대한 사전 데이터를 수집하는 데이터수집 기능; 수집데이터에서 토양유기탄소 변화량을 기반으로 그룹핑하여 분류하고, 보존경운에 따른 토양유기탄소 저장량 변화를 유발하는 주요인자를 분석하는 의사결정나무 분석기능; 각 그룹별 최적화된 RothC 모델의 TRM을 도출하는 TRM 모수화 기능; 경운에 따른 변화량을 예측하고자 하는 처리구의 그룹을 결정하고 상기 그룹에 최적화된 TRM을 기반으로 변화량을 예측하는 기능;을 실행시키는 컴퓨터에 의해 관독되는 토양 유기 탄소 저장 변화량 예측 프로그램으로서 달성될 수 있다.

### 발명의 효과

본 발명의 실시예에 따른 경운 방법별 토양 유기 탄소 저장 변화량 예측시스템 및 예측방법에 따르면, 경운 방법(관행경운 vs 보존경운)에 따른 토양 유기탄소 저장량의 차이를 1km 공간 해상도, 연 단위로 예측할 수 있는 효과를 갖는다.

본 발명의 실시예에 따른 경운 방법별 토양 유기 탄소 저장 변화량 예측시스템 및 예측방법에 따르면, 기존 전 세계적으로 토양 유기탄소 저장량 예측을 위해 사용되던 RothC 모델에 자료 동화 기법을 적용한 모델 파라미터 (Tillage Rate Modifiers, TRM)로 관행경운과 보존경운의 효과를 예측 가능한 효과를 갖는다.

본 발명의 실시예에 따른 경운 방법별 토양 유기 탄소 저장 변화량 예측시스템 및 예측방법에 따르면, 1) 국가 온실가스 인벤토리 농경지 토양 탄소 저장량 부문의 tier 3 수준 산정에 적용될 수 있고 2) 관행경운을 수행 중인 농지에 대하여, 보존경운 도입의 효과를 사전에 추정하는데 활용될 수 있으며 3) 현장 조사와 결합하여 농경지 토양 탄소 저장 증가량을 측정, 보고, 검증(MRV)하는데 사용됨으로써 자발적 탄소 시장에 발급할 탄소 크레딧의 신뢰도를 높일 수 있는 장점이 있다.

그리고 본 발명의 실시예에 따른 경운 방법별 토양 유기 탄소 저장 변화량 예측시스템 및 예측방법에 따르면, 자발적 탄소 시장 사업자(Verra 등)의 MRV 방법론 개선 또는 신규 방법론 등록에 사용되어 관련 프로젝트를 이끌어낼 수 있는 장점을 갖는다.

한편, 본 발명에서 얻을 수 있는 효과는 이상에서 언급한 효과들로 제한되지 않으며, 언급하지 않은 또 다른 효과들은 아래의 기재로부터 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 명확하게 이해될 수 있을 것이다.

### 도면의 간단한 설명

본 명세서에 첨부되는 다음의 도면들은 본 발명의 바람직한 실시예를 예시하는 것이며, 발명의 상세한 설명과 함께 본 발명의 기술적 사상을 더욱 이해시키는 역할을 하는 것이므로, 본 발명은 그러한 도면에 기재된 사항에만 한정되어 해석되어서는 아니 된다.

도 1은 본 발명의 실시예에 따른 포장시험의 수행 지점(노란박스는 중위도권(남반구와 북반구의 22.4도 ~ 66.5도)을 의미하며 210개의 포장시험은 모두 중위도권에서 수행되었음),

도 2는 본 발명의 실시예에 따른 보존경운 포장시험 데이터 조사 항목표

도 3은 본 발명의 실시예에 따른 210개 포장시험 데이터 기본 통계분석 결과(왼쪽은 각 포장시험의 대조구 토양

(경운) 유기탄소 저장량 분포. 오른쪽은 보존경운 도입에 따른 토양 유기탄소 저장 증가량의 분포임)

도 4는 본 발명의 실시예에 따른 의사결정나무 분석 결과,

도 5는 본 발명의 실시예에 따른 RothC 모델의 입력자료 표,

도 6 본 발명의 실시예에 따른 유전알고리즘을 통한 모수화 과정의 흐름도

도 7 본 발명의 실시예에 따른 모수화 결과로 도출된 4개 그룹, 4개 유기탄소 pool의 경운 수준 보정계수(30번째 세대의 평균과 표준오차) 표,

도 8은 본 발명의 실시예에 따른 보존경운 처리구 토양 유기탄소 저장량의 모델 추정치(x)와 실측값(y)(왼쪽은 모수화에 사용된 사례, 오른쪽은 검증에 사용된 사례임)

도 9는 본 발명의 실시예에 따른 우리나라 농경지에 대한 모델 시뮬레이션 결과(밭(왼쪽)과 논(오른쪽)의 시나리오 1과 2의 토양유기탄소 저장량 차이를 나타내었음( $\text{ton C ha}^{-1} 20\text{year}^{-1}$ ))

도 10은 본 발명의 실시예에 따른 관행경운(시나리오1)과 보존경운(시나리오2)이 도입되기 전(2021)과 후(2040)의 논, 밭 토양 유기탄소 저장량 변화 시뮬레이션 결과(99회 몬테카를로 시뮬레이션 결과의 평균과 표준편차)를 나타낸 것이다.

### 발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0038] 이상의 본 발명의 목적들, 다른 목적들, 특징들 및 이점들은 첨부된 도면과 관련된 이하의 바람직한 실시예들을 통해서 쉽게 이해될 것이다. 그러나 본 발명은 여기서 설명되는 실시예들에 한정되지 않고 다른 형태로 구체화될 수도 있다. 오히려, 여기서 소개되는 실시예들은 개시된 내용이 철저하고 완전해질 수 있도록 그리고 통상의 기술자에게 본 발명의 사상이 충분히 전달될 수 있도록 하기 위해 제공되는 것이다.
- [0039] 본 명세서에서, 어떤 구성요소가 다른 구성요소 상에 있다고 언급되는 경우에 그것은 다른 구성요소 상에 직접 형성될 수 있거나 또는 그들 사이에 제 3의 구성요소가 개재될 수도 있다는 것을 의미한다. 또한 도면들에 있어서, 구성요소들의 두께는 기술적 내용의 효과적인 설명을 위해 과장된 것이다.
- [0040] 본 명세서에서 기술하는 실시예들은 본 발명의 이상적인 예시도인 단면도 및/또는 평면도들을 참고하여 설명될 것이다. 도면들에 있어서, 막 및 영역들의 두께는 기술적 내용의 효과적인 설명을 위해 과장된 것이다. 따라서 제조 기술 및/또는 허용 오차 등에 의해 예시도의 형태가 변형될 수 있다. 따라서 본 발명의 실시예들은 도시된 특정 형태로 제한되는 것이 아니라 제조 공정에 따라 생성되는 형태의 변화도 포함하는 것이다. 예를 들면, 직각으로 도시된 영역은 라운드지거나 소정 곡률을 가지는 형태일 수 있다. 따라서 도면에서 예시된 영역들은 속성을 가지며, 도면에서 예시된 영역들의 모양은 소자의 영역의 특정 형태를 예시하기 위한 것이며 발명의 범주를 제한하기 위한 것이 아니다. 본 명세서의 다양한 실시예들에서 제1, 제2 등의 용어가 다양한 구성요소들을 기술하기 위해서 사용되었지만, 이들 구성요소들이 이 같은 용어들에 의해서 한정되어서는 안 된다. 이들 용어들은 단지 어느 구성요소를 다른 구성요소와 구별시키기 위해서 사용되었을 뿐이다. 여기에 설명되고 예시되는 실시예들은 그것의 상보적인 실시예들도 포함한다.
- [0041] 본 명세서에서 사용된 용어는 실시예들을 설명하기 위한 것이며 본 발명을 제한하고자 하는 것은 아니다. 본 명세서에서, 단수형은 문구에서 특별히 언급하지 않는 한 복수형도 포함한다. 명세서에서 사용되는 '포함한다(comprises)' 및/또는 '포함하는(comprising)'은 언급된 구성요소는 하나 이상의 다른 구성요소의 존재 또는 추가를 배제하지 않는다.
- [0042] 아래의 특정 실시예들을 기술하는데 있어서, 여러 가지의 특정적인 내용들은 발명을 더 구체적으로 설명하고 이해를 돕기 위해 작성되었다. 하지만 본 발명을 이해할 수 있을 정도로 이 분야의 지식을 갖고 있는 독자는 이러한 여러 가지의 특정적인 내용들이 없어도 사용될 수 있다는 것을 인지할 수 있다. 어떤 경우에는, 발명을 기술하는 데 있어서 흔히 알려졌으면서 발명과 크게 관련 없는 부분들은 본 발명을 설명하는데 있어 별 이유 없이 혼돈이 오는 것을 막기 위해 기술하지 않음을 미리 언급해 둔다.
- [0044] 이하에서는 본 발명의 실시예에 따른 경운 방법별 토양 유기탄소 저장 변화량 예측시스템의 구성, 기능 및 예측방법에 대해 설명하도록 한다.
- [0045] 이하 설명되는 본 발명의 실시예에 따르면, 다양한 토양 조건 하에서 보존 경작이 SOC 저장량에 미치는 영향을

평가하기 위해 Roth C 모델의 TRM을 개발하는 것을 목표로 한다.

- [0046] 본 발명의 발명자는 세계 농경지의 65%가 위치한 중위도 지역을 대상으로 했다. 이 목표를 달성하기 위해, 1) 관행경운 vs. 보존경운 쌍을 이룬 실험 데이터를 수집하고, 2) 보존경운이 SOC에 미치는 영향의 변동을 일으키는 주요 조건을 의사결정나무분석을 통해 식별하며, 3) 의사결정나무분석에서 식별된 네 가지 조건에 기반하여 보존경운에 대한 TRMs을 유전 알고리즘(GA)을 사용하여 도출하였다.
- [0047] 후에 설명되는 본 발명에 대한 검증, 평가를 위하여 본 발명의 실시예에 따른 TRM으로 보정된 RothC로 한국에서 사례 연구를 수행하여 보존경운의 SOC 격리 잠재력을 평가하였으며, 이에 대한 국가 규모 시뮬레이션 프레임워크를 제안한다. 이 프레임워크는 국가별 농작물 체계와 토양 조건을 고려하여 Tier 3 수준의 국가 온실가스 인벤토리 구축에 도움이 될 수 있을 것이다.
- [0049] 본 발명의 실시예에 따른 본 발명의 실시예에 따른 경운 방법별 토양 유기 탄소 저장 변화량 예측시스템은 기본적으로 데이터 수집부와, 의사결정나무분석부, TRM 모수화부 등을 포함하여 구성될 수 있다.
- [0050] 데이터 수집부는 경운 방법별 토양유기탄소 저장량 변화에 대한 사전 데이터를 수집하도록 구성된다. 그리고 의사결정나무 분석부는 수집데이터에서 토양유기탄소 변화량을 기반으로 그룹핑하여 분류하고, 보존경운에 따른 토양유기탄소 저장량 변화를 유발하는 주요인자를 분석하도록 구성된다. 또한 TRM 모수화부 각 그룹별 최적화된 RothC 모델의 TRM을 도출하도록 구성된다. 이하에서는 각 구성에 대한 구체적인 기능과 방법 및 실시예에 대해 설명하도록 한다.
- [0052] - 데이터 수집 -
- [0053] 본 발명의 실시예에 따른 데이터 수집부는, 대조구를 관행경운, 처리부를 보존경운으로 하여, 5년이상, 중위도 권에서 수행된 야외 포장시험, 특정 깊이 이상의 토양유기탄소 저장량 변화를 보고한 데이터인지를 기준으로 수집하도록 구성된다. 그리고 수집데이터로부터 보존경운 도입으로 토양유기탄소 저장량 변화를 파악하도록 구성된다.
- [0054] 도 1은 본 발명의 실시예에 따른 포장시험의 수행 지점(노란박스는 중위도권(남반구와 북반구의 22.4도 ~ 66.5도)을 의미하며 210개의 포장시험은 모두 중위도권에서 수행되었음)을 나타낸 것이다.
- [0055] 도 2는 본 발명의 실시예에 따른 보존경운 포장시험 데이터 조사 항목표를 도시한 것이다.
- [0056] 도 3은 본 발명의 실시예에 따른 210개 포장시험 데이터 기본 통계분석 결과(왼쪽은 각 포장시험의 대조구 토양(경운) 유기탄소 저장량 분포, 오른쪽은 보존경운 도입에 따른 토양 유기탄소 저장 증가량의 분포임)를 나타낸 것이다.
- [0057] 본 발명의 실시예에서는, 경운 방법별 토양유기탄소 저장량 차이를 보고한 문헌을 아래 기준에 따라 선별하였다. 총 77개 문헌에서 210개의 연구사례가 선별되었으며(도 1), 각 처리구의 토양유기탄소 저장량과 문헌 정보, 위치 정보, 기상 정보(기온, 강수량 등), 토지 이용 정보(논 또는 밭), 토양 정보(모래, 점토 함량), 농경지 관리 정보(보존경운 처리구의 경운 방법, 경운 처리구의 경운 깊이 등) 등의 정보를 수집하였다(도 2).
- [0058] 보존경운의 효과를 평가하기 위해서는 최소 5년 이상의 장기 포장시험 결과가 필요한데, 국내에는 이를 만족하는 시험 결과가 두 건에 불과하기 때문에 국외 포장시험 결과를 활용하였으며 국내 포장시험 결과는 모델로 생산한 토양유기탄소저장 변화량( $\Delta$ SOC값) 검증에 사용하였다.
- [0060] 1) 5년 이상, 중위도권 (남·북 위도 23° 26' 22" ~ 66° 33' 39")에서 수행된 야외 포장시험인가
- [0061] 2) 경운 방법 이외에 모든 처리(유기물 투입, 시비량 등)가 동일한 관행경운 플롯(대조구)과 보존경운 플롯(처리구)이 있는 포장시험인가
- [0062] 3) 30cm 깊이 이상의 토양유기탄소 저장량 변화를 보고한 논문인가
- [0064] 수집된 210개의 연구사례들은 다음과 같은 특성을 가지고 있다. 대조구(관행경운 처리구)의 토양 유기탄소 저장량은 평균 50.5ton C ha<sup>-1</sup>였으며, 14~112ton C ha<sup>-1</sup>까지 넓은 범위를 포괄하고 있다(도 3). 우리나라의 평균 토양 유기탄소 저장량은 35.2ton C ha<sup>-1</sup> (31.7~38.6ton C ha<sup>-1</sup>, 95% CI)로 수집된 해외 데이터에 포함되는 것을 확인하였다.
- [0065] 210개 연구사례의 결과에서 보존경운 도입에 따라 평균 10%의 토양 유기탄소 저장량이 증가한 것으로 나타났으

나, 그 범위는 -16% ~ +79%로 지역별 차이가 매우 큼을 알 수 있다. 보존경운 도입에 따른 변화는 평균 14.8년의 포장시험 결과를 통해 도출된 것이다.

[0067] - 의사결정나무 분석 -

[0068] 본 발명의 실시예에 따른 의사결정나무 분석부는 수집데이터에서 토양유기탄소 변화량을 기반으로 그룹핑하여 분류하고, 보존경운에 따른 토양유기탄소 저장량 변화를 유발하는 주요인자를 분석하도록 구성된다.

[0069] 의사결정나무 분석부는, 의사결정나무 분석을 통해 기상 및 토양 환경 변수, 농경지 관리 방법중 보존경운 효과 및 토양유기탄소 저장변화량의 지역별 차이를 유발하는 주요인자를 파악하고, 토양유기탄소 저장변화량이 유사한 유형 및 지역을 분류하도록 구성된다.

[0070] 본 발명의 실시예에 따른 의사결정나무 분석의 종속변수는  $\Delta SOC_R$  ( $\text{ton C ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ )로 하기 수학적 식 3을 통해 계산한다.

[0071] [수학적 식 3]

$$\Delta SOC_R = \frac{SOC_{\text{conservation}} - SOC_{\text{conventional}}}{\text{experimental duration}}$$

[0072]

[0073]  $SOC_{\text{conventional}}$ 은 관행경운 처리구의 특정 깊이 토양 유기탄소 저장량 ( $\text{ton C ha}^{-1}$ )을 의미하며,  $SOC_{\text{conservation}}$ 은 관행경운 처리구 특정 깊이(30cm) 토양의 중량과 동일한 양의 토양에 저장된 유기탄소의 양을 의미하고, experimental duration ( $\text{year}^{-1}$ )은 총 포장시험 기간을 의미한다. 의사결정나무 분석은 과적합, 선택 편향 문제에서 자유로운 ctree 알고리즘을 사용할 수 있다.

[0074] 의사결정나무 분석결과, 보존경운의 효과가 상이한 복수개의 그룹으로 분류된다.

[0075] 보존경운 효과의 지역별 차이를 가져오는 주요인자는 토양의 모래함량(sand content, %)과 대조구의 토양유기탄소 저장량( $\text{ton C ha}^{-1}$ )이다.

[0076] 도 4는 본 발명의 실시예에 따른 의사결정나무 분석 결과를 나타낸 것이다.

[0077] splitting node (SN)는 분류 기준이며, 분류된 결과는 terminal node (TN)으로 나타낸다. SN에 표시한 p값은 통계적 유의성을 나타내며,  $\Delta SOC_R$ 은 평균값, n은 사례의 수를 의미한다.

[0078] 수집한 연구사례들의 의사결정나무 분석을 통해 기상 및 토양 환경 변수, 농경지 관리 방법(도 1) 중 보존경운 효과,  $\Delta SOC$ 의 지역별 차이를 유발하는 주요인을 파악하고,  $\Delta SOC$ 가 유사한 사례/지역을 분류하였다.

[0079] 본 발명의 실시예에서는 보존경운의 효과가 유사한 각 그룹에 대해 차별화된 TRM을 도출하고자 했으며 이를 통해 정확도 개선을 기대할 수 있다.

[0080] 본 발명의 실시예에 따른 의사결정나무 분석결과, 210개의 연구사례는 보존경운의 효과가 상이한 4개의 그룹으로 분류되었으며, 보존경운 효과의 지역별 차이를 가져오는 주요인은 토양의 모래함량(sand content, %)과 대조구의 토양유기탄소 저장량( $\text{ton C ha}^{-1}$ )이었다(도 4).

[0081] 모래함량이 37.6%보다 높은 토양의 경우, 보존경운 도입에 따른 토양유기탄소 저장 증가 효과가 그렇지 않은 토양보다 평균 3.8배 높았다. 또한 위 토양 조건(Terminal node 3과 4)에 해당하는 89개 사례 중 약 93%가 보존경운 도입으로 인해 토양 유기탄소 저장량이 증가하는 것으로 나타남을 알 수 있다.

[0082] 또한 의사결정나무 분석을 통해 보존경운 도입 시 토양 유기탄소 저장량이 변하지 않거나 오히려 감소하는 특정 토양 조건을 발견하였다(Terminal node 1과 2).

[0084] - TRM 모수화 -

[0085] 본 발명의 실시예에 따른 TRM 모수화부는 각 그룹별 최적화된 RothC 모델의 TRM을 도출하도록 구성된다. 본 발명의 실시예에 따른 TRM 모수화부는 유전 알고리즘(Genetic algorithm)을 통한 TRM 모수화를 진행한다. 즉, TRM 모수화부는, 훈련용 데이터 세트에 대한 모델 입력자료 데이터 세트 구축하고, 유전 알고리즘 (Genetic algorithm)을 통한 TRM 모수화를 진행하도록 구성된다.

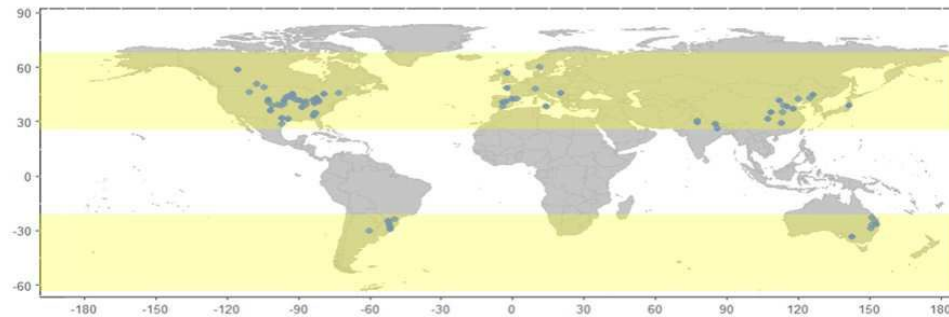
- [0086] 도 5는 본 발명의 실시예에 따른 RothC 모델의 입력자료 표를 도시한 것이다.
- [0087] 도 6 본 발명의 실시예에 따른 유전알고리즘을 통한 모수화 과정의 흐름도를 도시한 것이다.
- [0088] 도 7 본 발명의 실시예에 따른 모수화 결과로 도출된 4개 그룹, 4개 유기탄소 pool의 경운 수준 보정계수(30번째 세대의 평균과 표준오차) 표를 나타낸 것이다.
- [0089] 본 발명의 실시예에서는 의사결정나무 분석을 통해 중위도 지역에서 보존경운 효과의 공간적 변이를 야기하는 요인을 성공적으로 파악하였으며, 4개의 그룹 각각에 최적화된 RothC 모델의 TRM을 도출하였다
- [0090] 총 210건의 연구 사례 중 180건은 TRM 모수화(parameterization)에 사용되었으며, 나머지 30건은 개발된 TRM의 검증에 사용되었음. 이 때, 모수화에 사용된 180건의 연구 사례는 의사결정나무 분석으로 분류된 4개의 그룹에서 랜덤하게 추출되었다. 본 발명의 실시예에서는 관행경운을 기준으로 하였으며(관행경운 TRM = 1), 보존경운의 TRM이 도출되었다.
- [0091] TRM 도출과정은 다음과 같다
- [0092] 1) 180개의 훈련용 데이터 세트에 대한 모델 입력자료 데이터 세트 구축(표5).
- [0093] 2) 유전 알고리즘 (Genetic algorithm)을 통한 TRM 모수화.
- [0094] 유전 알고리즘은 생물의 자연선택과 유전법칙을 모방한 최적해 탐색 방법으로 본 발명의 실시예에서는 정확도가 가장 높은 TRM을 찾기 위해 사용되었다.
- [0095] 모수화는 5개의 탄소 pool 중 분해가 되지 않는 IOM pool을 제외한 나머지 4개 탄소 pool의 경운 수준별 분해속도 보정계수를 도 6의 순서에 따라 도출하였다.
- [0096] 4개 그룹, 4개 pool에 대한 TRM 총 16개가 개발되었으며, 한 세대별로 200개씩 30세대, 총 6,000개의 TRM 세트가 최적 TRM 도출을 위해 평가되었다.
- [0097] RothC의 구동에는 R(버전 4.2.1) 프로그램의 Soil R 패키지를 활용하였으며 유전알고리즘의 구동에는 R의 mco 패키지를 활용하였다.
- [0098] 유전알고리즘을 통해 개발된 모수는 모수화에 사용되지 않은 30건의 연구사례를 통해 검증되었으며, 평가지표로는 RMSE (Root Mean Squared Error) 와  $R^2$ 가 사용되었다.
- [0099] 도출된 4개 그룹, 4개 탄소 pool의 TRM은 도 7의 표와 같다. 4개의 탄소 pool 중 분해속도가 상대적으로 느리고 크기가 큰 RPM, HUM pool이 전체 토양 유기탄소 저장량을 결정하며, 분해속도가 상대적으로 빠른 DPM과 BIO pool은 그 크기가 매우 작다.
- [0100]  $\Delta$ SOC가 0보다 큰 사례들의 집합인 TN3과 TN4에서는 RPM과 HUM pool의 TRM이 1보다 작은 값으로 도출되었는데, 이는 보존경운으로 인해 감소하는 분해속도가 잘 반영되었음을 의미한다. TRM 모수화에 사용된 180개 사례와, 검증에 사용된 30개 사례에 대해서 보존경운 처리구 토양유기탄소 저장량의 관측값과 모델 추정값을 비교한 그래프는 도 8와 같다. 이를 통해 TRM이 적용된 RothC 모델이 보존경운의 효과를 높은 정확도로 모사할 수 있음을 확인하였다
- [0102] - 평가 분석 -
- [0103] 검증이 완료된 RothC 모델로 우리나라의 보존경운 효과 자료를 생산하기 위해 모델의 입력자료 데이터베이스를 구축하였다. 모든 데이터의 공간해상도는 1km로 통일하였으며, 사용된 자료는 다음과 같다.
- [0104] 30cm 깊이의 토양유기탄소 저장량 지도는 FAO에 제출한 자료를 활용하였다 (FAO 2022). 토양 모래 함량과 점토 함량 지도는 FAO에서 활용중이고, 현재 전 세계적으로 가장 널리 활용되고 있는 SoilGrids<sup>TM</sup> 자료(Hengl et al., 2017)를 사용하였으며, 토지이용 데이터는 환경부의 최신 토지피복도 자료를 사용하였다. 기상자료는 537개의 관측소 측정 자료를 바탕으로 기상청에서 제작한 1km 해상도의 자료를 사용하였으며, 토지피복 데이터는 FAO의 기술보고서에 따라 위성자료(MODIS- MOD13A2)를 사용하였다.
- [0105] 도 8은 보존경운 처리구 토양 유기탄소 저장량의 모델 추정치(x)와 실측값(y)(왼쪽은 모수화에 사용된 사례, 오른쪽은 검증에 사용된 사례임)를 나타낸 것이다.
- [0106] 도 9는 우리나라 농경지에 대한 모델 시뮬레이션 결과(밭(왼쪽)과 논(오른쪽))의 시나리오 1과 2의 토양유기탄

소 저장량 차이를 나타낸 것이다( $\text{ton C ha}^{-1} 20\text{year}^{-1}$ ).

- [0107] 도 10은 본 발명의 실시예에 따른 관행경운(시나리오1)과 보존경운(시나리오2)이 도입되기 전(2021)과 후(2040)의 논, 밭 토양 유기탄소 저장량 변화 시뮬레이션 결과(99회 몬테카를로 시뮬레이션 결과의 평균과 표준편차)를 나타낸 것이다.
- [0108] 수집된 우리나라의 기상·토양·토지피복 빅데이터와 TRM이 적용된 RothC 모델을 사용하여 경운 방법별 토양유기탄소 축적량 자료를 생산하였다.
- [0109] 자료 생산을 위해 RothC 모델을 두 개의 시나리오 하에서 구동하였는데, 첫 번째 시나리오는 베이스라인으로써 우리나라의 모든 논과 밭에 관행경운이 도입되는 경우, 두 번째 시나리오는 보존경운을 가능한 최대 면적에 도입하는 경우이다.
- [0110] 여기서 보존경운이 도입 가능한 지역은
- [0111] 1) 모래함량이 37.6%보다 높아서 보존경운 도입 시 토양 유기탄소 함량이 증가하는 지역(도 4),
- [0112] 2) 감자, 고구마, 당근, 무 등 수확 시 토양 교란이 발생하는 뿌리작물을 재배하지 않는 지역이다.
- [0113] 이때 뿌리작물 재배지역에 대한 위치정보가 국내에 없고 재배면적 자료만 있기 때문에(210,200ha, 전체 농경지면적의 14.4%), 전국에서 랜덤하게 위 면적에 해당하는 지역을 제외하였다.
- [0114] 모래함량이 37.6%보다 낮은 지역은 보존경운이 도입됨에 따라 토양유기탄소 저장량이 변화 없거나 감소할 위험이 있는 지역이기 때문에 대상지에서 제외하였다. 또한 감자, 고구마 등 뿌리작물은 수확 시 경운에 준하는 토양 교란이 발생한다고 판단하여 대상지에서 제외하였다. 이는 보존경운의 효과를 과대평가하지 않기 위한 보수적인 접근방식이다.
- [0115] 결과적으로 전국의 밭 36,832지점, 논 39,104지점, 총 738,779ha의 농경지의 경운 방법별 토양유기탄소 축적량 자료가 수집되었다. 모델 시뮬레이션 기간은 20년으로 IPCC 가이드라인의 평형상태 기준에 따랐다
- [0116] 입력자료와 도출된 TRM의 불확도를 토양유기탄소 축적량 자료에 반영하기 위해 몬테카를로 시뮬레이션 방법을 도입하였다. 두 개의 시나리오에 따라 각각 99번의 모델 시뮬레이션이 수행되었는데, 이 때 입력자료와 TRM 값이 각 데이터의 확률 밀도 함수(probability distribution function) 내에서 랜덤하게 선택·모델 시뮬레이션에 사용되었다
- [0117] 99번의 반복 시뮬레이션 결과, 도 9와 같은 결과를 얻을 수 있었다. 도 9는 각각 밭(왼쪽)과 논(오른쪽)의 시나리오 1과 2의 토양유기탄소 저장량 차이, 즉 보존경운을 20년간 도입했을 때 증가한 토양유기탄소 축적량을 의미한다.
- [0118] 전국을 평균했을 때, 보존경운이 도입된 밭과 논에서 토양유기탄소 저장량이 관행경운 대비 각각 26%, 15% 증가한 것으로 나타났다.
- [0119] 99번의 몬테카를로 시뮬레이션 결과, 우리나라의 관행경운, 보존경운 도입에 따른 논과 밭의 토양 유기탄소 저장량 변화의 평균값과 표준편차가 도 10과 같이 나타난다. 전국적으로 보았을 때, 보존경운이 도입됨에 따라 5.14 Tg C이 20년간 저장될 수 있을 것으로 기대되며, 이는 대한민국 농업 부문 온실가스 배출량의 7.99 ~ 8.40 % (95% 신뢰구간)을 상쇄할 수 있는 양이다.
- [0121] 또한, 상기와 같이 설명된 장치 및 방법은 상기 설명된 실시예들의 구성과 방법이 한정되게 적용될 수 있는 것이 아니라, 상기 실시예들은 다양한 변형이 이루어질 수 있도록 각 실시예들의 전부 또는 일부가 선택적으로 조합되어 구성될 수도 있다.

## 도면

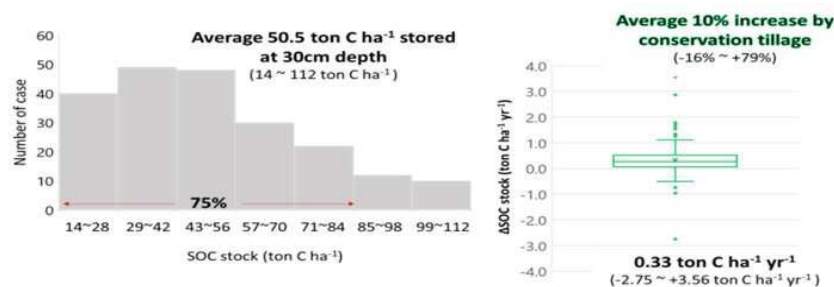
### 도면1



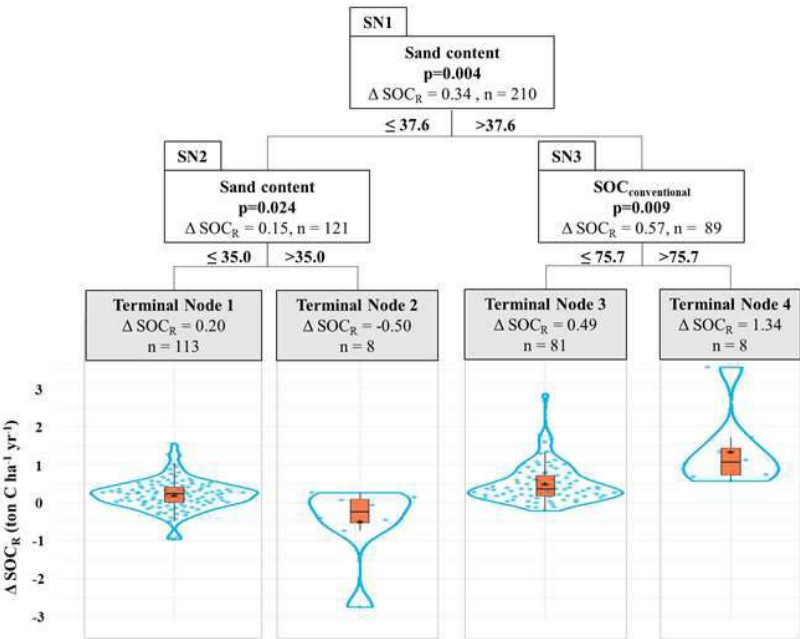
### 도면2

|           | 변수명                          | 비고                                                 |
|-----------|------------------------------|----------------------------------------------------|
| 위치 정보     | Latitude                     | 연속형: 위도(°)                                         |
|           | Longitude                    | 연속형: 경도(°)                                         |
|           | Continent/Country            | 범주형: 대륙명/국가명                                       |
| 기상 정보     | MAT                          | 연속형: 연 평균 기온(°C)                                   |
|           | MAP                          | 연속형: 평균 연 강수량(mm)                                  |
|           | MAE                          | 연속형: 평균 연 증발산량(mm)                                 |
|           | HI                           | 연속형: 건습지수 (mm °C <sup>-1</sup> )                   |
| 토지 이용 정보  | cropland type                | 범주형: 논 또는 밭                                        |
| 토양 정보     | SOC <sub>initial</sub>       | 연속형: 시험 전 토양 유기탄소 저장량(ton C ha <sup>-1</sup> )     |
|           | SOC <sub>conventional</sub>  | 연속형: 대조구의 토양 유기탄소 저장량(ton C ha <sup>-1</sup> )     |
|           | SOC <sub>conservation</sub>  | 연속형: 처리구의 토양 유기탄소 저장량(ton C ha <sup>-1</sup> )     |
|           | Clay                         | 연속형: 점토함량(%)                                       |
|           | Sand                         | 연속형: 모래함량(%)                                       |
| 농경지 관리 정보 | Type of tillage              | 범주형: 대조구의 경운 방법 (Moldboard, Chisel, other)         |
|           | Type of conservation tillage | 범주형: 보존경운 처리구의 경운 방법 (no-tillage, reduced tillage) |
|           | Tillage depth of control     | 연속형: 대조구의 경운 깊이 (cm)                               |
|           | Residue regime               | 범주형: 작물잔사 처리 방법 (제거, 존치)                           |
|           | Experimental duration        | 연속형: 년(yr <sup>-1</sup> )                          |
|           | Starting year                | 연속형: 년(yr <sup>-1</sup> )                          |

### 도면3



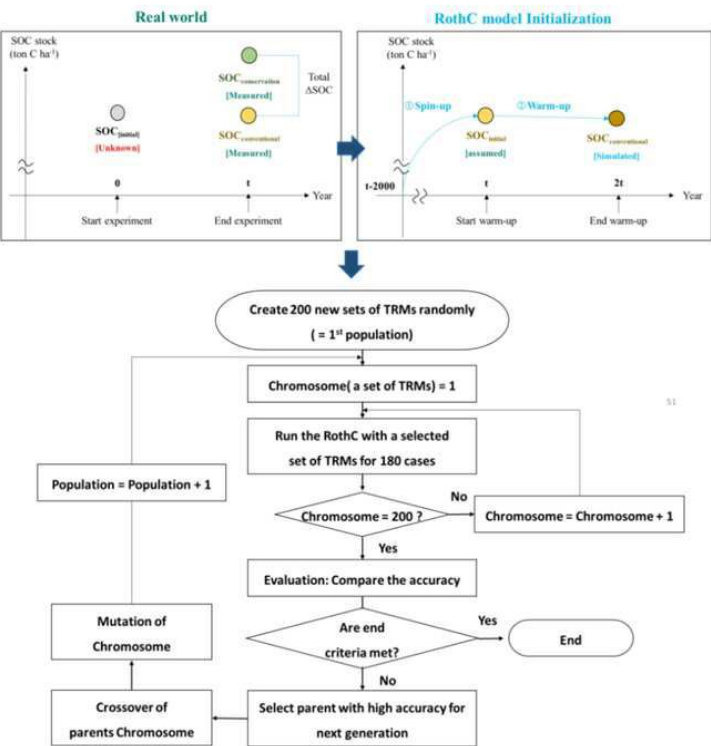
도면4



도면5

| RothC 모델의 입력자료 |                                         |                                                                                                                                                                            |
|----------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 범주             | 자료명                                     | 자료의 출처                                                                                                                                                                     |
| 기상             | 월별 평균 기온(℃)                             | Harris, I.C et al., (2021): Climatic Research Unit Time-Series version 4.05 of high-resolution gridded data of month-by-month variation in climate (1901년 1월 ~ 2020년 12월). |
|                | 월별 강수량(mm)                              |                                                                                                                                                                            |
|                | 월별 증발산량(mm)                             |                                                                                                                                                                            |
| 토양             | 초기 토양 유기탄소 저장량(ton C ha <sup>-1</sup> ) | 문헌에서 보고된 값. 모수화를 위한 180개의 데이터 셋의 경우 초기 토양 유기탄소 저장량 값을 보고하지 않았기 때문에 RothC를 통해 추정하였음                                                                                         |
|                | 점토 함량(%)                                | 문헌에서 보고된 값. 문헌에 값이 없는 경우 Soilgrid250m v2.0(ISRIC, 2020)의 값을 사용함                                                                                                            |
|                | 모래 함량(%)                                |                                                                                                                                                                            |
| 식생             | 탄소 유입량 (ton C ha <sup>-1</sup> )        | 1. RothC spin up 시뮬레이션 (2,000년)을 통해 평형값 추정<br>2. 기상데이터를 통한 NPP 추정                                                                                                          |
|                | 월별 식생 피복도 (unitless)                    | MODIS NDVI                                                                                                                                                                 |
| 토지 이용          | 토지 이용 (논 또는 밭)                          | 문헌에서 보고된 값                                                                                                                                                                 |

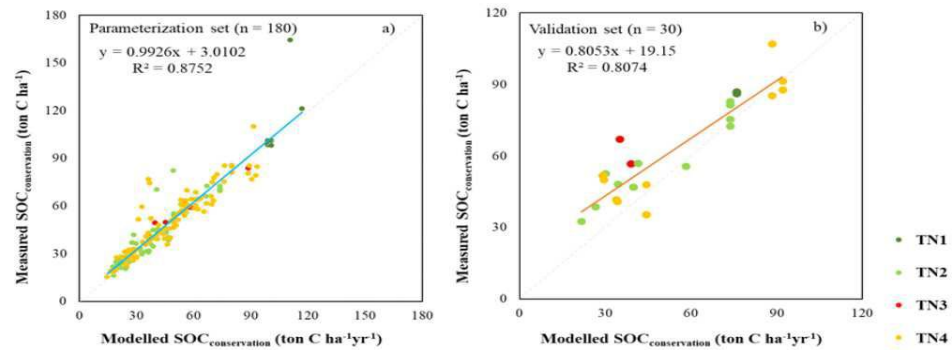
도면6



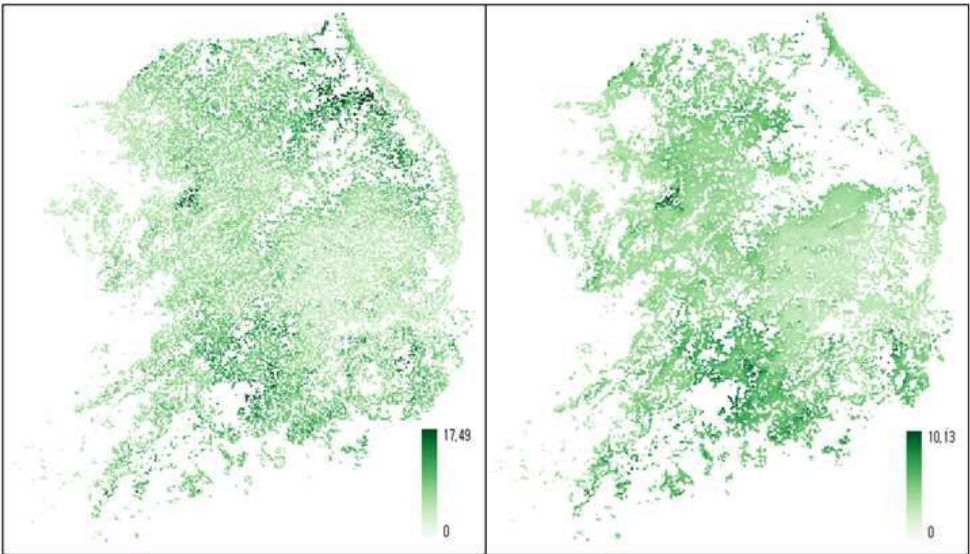
도면7

| Terminal node (TN) <sup>o</sup> | C Pools <sup>o</sup>   |                        |                        |                        |
|---------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|                                 | DPM <sup>o</sup>       | RPM <sup>o</sup>       | BIO <sup>o</sup>       | HUM <sup>o</sup>       |
| TN1 <sup>o</sup>                | 0.72±0.07 <sup>o</sup> | 0.97±0.02 <sup>o</sup> | 0.99±0.05 <sup>o</sup> | 0.94±0.02 <sup>o</sup> |
| TN2 <sup>o</sup>                | 1.54±0.16 <sup>o</sup> | 2.15±0.03 <sup>o</sup> | 2.38±0.07 <sup>o</sup> | 2.93±0.01 <sup>o</sup> |
| TN3 <sup>o</sup>                | 1.71±0.12 <sup>o</sup> | 0.35±0.01 <sup>o</sup> | 0.38±0.01 <sup>o</sup> | 0.87±0.01 <sup>o</sup> |
| TN4 <sup>o</sup>                | 1.54±0.06 <sup>o</sup> | 0.35±0.01 <sup>o</sup> | 1.42±0.03 <sup>o</sup> | 0.42±0.01 <sup>o</sup> |

도면8



도면9



도면10

| Scenario  |             | SOC stock              |                  | Changes in SOC stock |
|-----------|-------------|------------------------|------------------|----------------------|
|           |             | 2021 (Initial)         | 2040 (end point) |                      |
|           |             | ton C ha <sup>-1</sup> |                  |                      |
| Scenario1 | Upland      | 33.44 ± 11.02          | 32.58 ± 11.19    | -0.86 ± 0.86         |
|           | Paddy field | 31.00 ± 8.19           | 30.39 ± 8.29     | -0.61 ± 0.47         |
| Scenario2 | Upland      | 33.44 ± 11.02          | 36.54 ± 13.61    | 3.09 ± 4.70          |
|           | Paddy field | 31.00 ± 8.19           | 33.61 ± 9.72     | 2.61 ± 2.44          |

【심사관 직권보정사항】

【직권보정 1】

【보정항목】 청구범위

【보정세부항목】 청구항 1

【변경전】

토양 유기 탄소 저장 변화량 예측시스템으로서,

경운 방법별 토양유기탄소 저장량 변화에 대한 사전 데이터를 수집하는 데이터 수집부; 수집데이터에서 토양유기탄소 변화량을 기반으로 그룹핑하여 분류하고, 보존경운에 따른 토양유기탄소 저장량 변화를 유발하는 주요인자를 분석하는 의사결정나무 분석부; 및 각 그룹별 최적화된 RothC 모델의 TRM을 도출하는 TRM 모수화부;를 포함하고,

상기 데이터 수집부는,

대조구를 관행경운, 처리부를 보존경운으로 하여, 5년이상 및 중위도권에서 수행된 야외 포장시험과 특정 깊이 이상의 토양유기탄소 저장량 변화를 보고한 데이터인지를 기준으로 수집하고, 상기 수집데이터는 각 처리구 별로, 토양유기탄소 저장량과, 위치 정보, 기상 정보, 토지 이용 정보, 토양 정보, 및 농경지 관리 정보를 포함하며, 상기 수집데이터로부터 보존경운 도입으로 토양유기탄소 저장량 변화를 파악하며,

상기 의사결정나무 분석부는,

의사결정나무 분석을 통해 기상과 토양 환경 변수, 및 농경지 관리 방법중 보존경운 효과 및 토양유기탄소 저장 변화량의 지역별 차이를 유발하는 주요인자인 토양의 모래함량(sand content, %)과 대조구의 토양유기탄소 저장

량( $\text{ton C ha}^{-1}$ )을 파악하여 토양유기탄소 저장변화량이 유사한 유형 및 지역을 분류하여, 의사결정나무 분석결과 보존경운의 효과가 상이한 복수개의 그룹으로 분류되고,

상기 TRM 모수화부는, 유전 알고리즘(Genetic algorithm)을 통한 TRM 모수화를 진행하며, 훈련용 데이터 세트에 대한 모델 입력자료 데이터 세트 구축하고, 유전 알고리즘 (Genetic algorithm)을 통한 TRM 모수화를 진행하는 것을 특징으로 하는 경운 방법별 토양 유기 탄소 저장 변화량 예측시스템.

#### 【변경후】

토양 유기 탄소 저장 변화량 예측시스템으로서,

경운 방법별 토양유기탄소 저장량 변화에 대한 사전 데이터를 수집하는 데이터 수집부; 수집데이터에서 토양유기탄소 변화량을 기반으로 그룹핑하여 분류하고, 보존경운에 따른 토양유기탄소 저장량 변화를 유발하는 주요인자를 분석하는 의사결정나무 분석부; 및 각 그룹별 최적화된 RothC 모델의 TRM을 도출하는 TRM 모수화부;를 포함하고,

상기 데이터 수집부는,

대조구를 관행경운, 처리구를 보존경운으로 하여, 5년이상 및 중위도권에서 수행된 야외 포장시험과 특정 깊이 이상의 토양유기탄소 저장량 변화를 보고한 데이터인지를 기준으로 수집하고, 상기 수집데이터는 각 처리구 별로, 토양유기탄소 저장량과, 위치 정보, 기상 정보, 토지 이용 정보, 토양 정보, 및 농경지 관리 정보를 포함하며, 상기 수집데이터로부터 보존경운 도입으로 토양유기탄소 저장량 변화를 파악하며,

상기 의사결정나무 분석부는,

의사결정나무 분석을 통해 기상과 토양 환경 변수, 및 농경지 관리 방법중 보존경운 효과 및 토양유기탄소 저장 변화량의 지역별 차이를 유발하는 주요인자인 토양의 모래함량(sand content, %)과 대조구의 토양유기탄소 저장량( $\text{ton C ha}^{-1}$ )을 파악하여 토양유기탄소 저장변화량이 유사한 유형 및 지역을 분류하여, 의사결정나무 분석결과 보존경운의 효과가 상이한 복수개의 그룹으로 분류되고,

상기 TRM 모수화부는, 유전 알고리즘(Genetic algorithm)을 통한 TRM 모수화를 진행하며, 훈련용 데이터 세트에 대한 모델 입력자료 데이터 세트 구축하고, 유전 알고리즘 (Genetic algorithm)을 통한 TRM 모수화를 진행하는 것을 특징으로 하는 경운 방법별 토양 유기 탄소 저장 변화량 예측시스템.

#### 【식권보정 2】

【보정항목】 청구범위

【보정세부항목】 청구항 11

#### 【변경전】

제 1항에 따른 경운 방법별 토양 유기 탄소 저장 변화량 예측시스템을 이용한 토양 유기 탄소 저장 변화량 예측 방법으로서,

데이터 수집부가 경운 방법별 토양유기탄소 저장량 변화에 대한 사전 데이터를 수집하는 제1단계;

의사결정나무 분석부가 수집데이터에서 토양유기탄소 변화량을 기반으로 그룹핑하여 분류하고, 보존경운에 따른 토양유기탄소 저장량 변화를 유발하는 주요인자를 분석하는 제2단계; 및

TRM 모수화부가 각 그룹별 최적화된 RothC 모델의 TRM을 도출하는 제3단계;

경운에 따른 변화량을 예측하고자 하는 처리구의 그룹을 결정하고 상기 그룹에 최적화된 TRM을 기반으로 변화량을 예측하는 제4단계;를 포함하고,

상기 제1단계에서,

상기 데이터 수집부는, 대조구를 관행경운, 처리부를 보존경운으로 하여, 5년이상 및 중위도권에서 수행된 야외 포장시험과 특정 깊이 이상의 토양유기탄소 저장량 변화를 보고한 데이터인지를 기준으로 수집하고, 상기 수집 데이터로부터 보존경운 도입으로 토양유기탄소 저장량 변화를 파악하는 것을 특징으로 하는 경운 방법별 토양

유기 탄소 저장 변화량 예측방법.

【변경후】

제 1항에 따른 경운 방법별 토양 유기 탄소 저장 변화량 예측시스템을 이용한 토양 유기 탄소 저장 변화량 예측 방법으로서,

데이터 수집부가 경운 방법별 토양유기탄소 저장량 변화에 대한 사전 데이터를 수집하는 제1단계;

의사결정나무 분석부가 수집데이터에서 토양유기탄소 변화량을 기반으로 그룹핑하여 분류하고, 보존경운에 따른 토양유기탄소 저장량 변화를 유발하는 주요인자를 분석하는 제2단계;

TRM 모수화부가 각 그룹별 최적화된 RothC 모델의 TRM을 도출하는 제3단계; 및

경운에 따른 변화량을 예측하고자 하는 처리구의 그룹을 결정하고 상기 그룹에 최적화된 TRM을 기반으로 변화량을 예측하는 제4단계;를 포함하고,

상기 제1단계에서,

상기 데이터 수집부는, 대조구를 관행경운, 처리구를 보존경운으로 하여, 5년이상 및 중위도권에서 수행된 야외 포장시험과 특정 깊이 이상의 토양유기탄소 저장량 변화를 보고한 데이터인지를 기준으로 수집하고, 상기 수집 데이터로부터 보존경운 도입으로 토양유기탄소 저장량 변화를 파악하는 것을 특징으로 하는 경운 방법별 토양 유기 탄소 저장 변화량 예측방법.