

Research Article

# 초지 바이오매스 부문 온실가스 인벤토리 구축을 위한 국제 동향과 국내 적용 가능성 평가

이슬기<sup>1</sup>, 이정관<sup>2</sup>, 김현준<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>상지대학교 조경산림학과

<sup>2</sup>전남대학교 산림자원학과

## Verification of International Trends and Applicability in the Republic of Korea for a Greenhouse Gas Inventory in the Grassland Biomass Sector

Sle-gee Lee<sup>1</sup>, Jeong-Gwan Lee<sup>2</sup> and Hyun-Jun Kim<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Forest Landscape Architecture, Sangji University

<sup>2</sup>Department of Forest Resources, Chonnam National University

### ABSTRACT

The grassland section of the greenhouse gas inventory has limitations due to a lack of review and verification of biomass compared to organic carbon in soil while grassland is considered one of the carbon storages in terrestrial ecosystems. Considering the situation at internal and external where the calculation of greenhouse gas inventory is being upgraded to a method with higher scientific accuracy, research on standards and methods for calculating carbon accumulation of grassland biomass is required. The purpose of this study was to identify international trends in the calculation method of the grassland biomass sector that meets the Tier 2 method and to conduct a review of variables applicable to the Republic of Korea. Identify the estimation methods and access levels for grassland biomass through the National Inventory Report in the United Nations Framework Convention on Climate Change and type the main implications derived from overseas cases. And, a field survey was conducted on 28 grasslands in the Republic of Korea to analyse the applicability of major issues. Four major international issues regarding grassland biomass were identified. 1) country-specific coefficients by land use; 2) calculations on woody plants; 3) loss and recovery due to wildfire; 4) amount of change by human activities. As a result of field surveys and analysis of activity data available domestically, it was found that there was a significant difference in the amount of carbon in biomass according to use type classification and climate zone-soil type classification. Therefore, in order to create an inventory of grassland biomass at the Tier 2 level, a policy and institutional system for making activity data should develop country-specific coefficients for climate zones and soil types.

**(Key words):** Grassland biomass carbon, Greenhouse Gas Inventory, LULUCF, NIRs review, Tier 2 method)

### I. 서론

온실가스 인벤토리는 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 가이드라인의 산정 방법을 기초로 각 국가별 상황에 따라 다양한 방식으로 적용되고 있다(IPCC, 2019). 온실가스 인벤토리의 산업 분야가 탄소 배출원으로 간주되는 것과 달리, LULUCF (Land Use, Land-Use Change and Forestry)는 탄소의 저장고 역할을 통해 생태계 탄소 순환에 중요한 역할을 담당하고 있다. 초지는 전 세계 토지 이용의 1/4을 차지하고 있으며 높은 탄소 흡수 잠재력을 가진 토지 피복으로 인정받고 있지만

LULUCF 내 타 분야에 비해 연구가 활발히 이루어지지 않고 있다(Ghosh and Marjanta, 2014).

초지 분야는 크게 바이오매스와 토양으로 세분화되며, IPCC 가이드라인에서 제시한 Tier 1 산정 방법에 따라 바이오매스의 연 변화량은 없는 것으로 간주하여 토양 내 유기탄소를 중심으로 기후변화 협약 당사국 보고서(NIR, National Inventory Report)가 작성되고 있다. 이에, 학계에서는 초지 바이오매스의 탄소 흡수 효과를 정량화하는 연구가 진행되고 있으며, 주로 낙농업이 발달하여 초지 면적이 넓게 분포하는 국가에서는 이러한 정보를 활용하여 초지 바이오매스의 탄소축적량을 NIR에 포함하고 있다

\*Corresponding author: Hyun-Jun Kim, Department of Forest Resources, Chonnam National University, Gwangju 61186, Republic of Korea, Tel: +82-62-530-2082, E-mail: hjkim0837@jnu.ac.kr

(Chou et al., 2008; Fan et al., 2008; Xia et al., 2014). 이 과정에서 LULUCF 내 타 분야가 IPCC 가이드라인의 Tier 1 방법을 개선한 형태의 방법으로 적용되고 있는 추세와 달리, 초지 바이오매스 부문은 Tier 1 산정 방법이 없기 때문에 큰 틀에서의 기준 없이 초지 구성, 유형 분류, 활용 변수가 국가별로 차이가 크게 나타난다. 이러한 특성은 초지 바이오매스에 대한 상대적으로 낮은 사회적 관심과 결부되어 관련 연구가 상대적으로 부족한 상황을 야기했다.

국내의 경우 국가 온실가스 인벤토리 보고서의 초지 분야는 Tier 1 산정 방법과 Approach 1 접근 수준을 기준으로 작성되고 있다(Greenhouse Gas Inventory and Research Center, 2019). 따라서 IPCC 가이드라인의 기준에 따라 초지 바이오매스는 산정하지 않고 있으며, 토양 내 유기탄소에 대한 탄소축적량을 초지 면적 통계를 활용해 계산한다. 최근 국내 LULUCF 각 분야는 Tier 2, Approach 3 수준을 목표로 국내 실정에 맞는 국가고유계수와 방법론을 개발해 나가고 있으며, 활동 자료의 공간 정확성을 위해 각 분야 산정 기관의 협력이 지속적으로 논의되고 있는 단계에 있다(Son et al., 2014; Lee et al., 2019; Lee et al., 2020). 국내 초지 분야에서는 Tier 2 이상의 방법으로 온실가스 인벤토리를 개발하는 과정에서 초지 바이오매스에 대한 탄소축적량을 산정할 것인지 아니면 Tier 1 기준에 따라 변화량이 없는 것으로 간주할 것인지가 중요한 화두이다. 반면, 이를 검토하기 위한 기초 자료가 부족하여 관련 연구들이 더디게 진행되고 있고, 초지 바이오매스 부문에 대한 적극적인 검토가 미흡한 실정이다. 이런 관점에서 초지 바이오매스 부문에 대한 국내 Tier 2 방법 개발을 위한 국외 사례에 대한 검토와 검증이 시급히 요구되고 있다. 이에 본 연구는 Tier 2 수준의 초지 바이오매스 부문의 국가 온실가스 인벤토리 산정 방법을 개발하기 위한 선행 연구로서 초지 바이오매스에 대한 국제 동향을 파악하고 국내 상황에 적용 가능한 변수들의 검토를 수행하는 것을 목적으로 한다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 초지 바이오매스 부문 온실가스 인벤토리 산정 기준과 국제적 경향

초지 바이오매스에 대한 국제적 접근 경향을 분석하기 위하여 UNFCCC에 보고된 NIR를 수집하여 국가별 특징을 규명하였다(<https://unfccc.int/ghg-inventories-annex-i-parties/2023>). NIR 검토 범위는 감축 의무가 부과되어 매년 NIR을 제출하는 Annex I 국가의 2021년부터 2023년까지의 자료를 대상으로 하였다. 총 44개국의 NIR 중 영어 외 언어로 작성되었거나 국토 면적이 지

나치게 협소한 국가를 제외하고 30개 NIR(그리스, 네덜란드, 노르웨이, 덴마크, 독일, 라트비아, 루마니아, 리투아니아, 미국, 벨기에, 불가리아, 스웨덴, 스위스, 슬로바키아, 슬로베니아, 아이슬란드, 에스토니아, 영국, 오스트리아, 우크라이나, 일본, 체코, 캐나다, 크로아티아, 터키, 포르투갈, 폴란드, 핀란드, 헝가리, 호주)을 분석하였다. 초지 분야는 바이오매스와 토양 부문으로 세분화되어 있는데, NIR에 기재된 산정 방법(Tier)은 모든 하위 부문을 포함한 분야별 수준으로 기재되는 경향이 있다. 바이오매스 산정 방법이 토양보다 낮은 Tier가 적용되었으나 토양에 적용된 상위 Tier로 적용된 국가는 19개국(노르웨이, 덴마크, 벨기에, 스위스, 영국, 오스트리아, 일본, 캐나다, 포르투갈, 폴란드, 체코, 에스토니아, 그리스, 아이슬란드, 리투아니아, 슬로바키아, 슬로베니아, 터키, 우크라이나)으로 본 연구에서 분석한 30개 NIR 중 약 63.3%를 차지한다. 이는 초지의 탄소 흡수 효과를 산정하지 않고, 국가고유계수를 적용하지 않기 때문에 엄밀한 의미에서 IPCC 가이드라인 기준의 Tier 1 방법에 부합되지만 산정 방법이 Tier 2로 표기되어 정확한 산정 방법의 경향을 파악하는데 어려움을 유발한다. 또한, 초지는 LULUCF 내 다른 분야에 비해 상대적으로 국가별 산정 방식의 차이가 두드러지는 특징이 나타난다. 이는 IPCC 가이드라인의 Tier 1 방법에서 초지 바이오매스의 연 변화가 0에 수렴하는 것으로 정의되어 있어 산정식이 제시되지 않고 있기 때문에 Tier 2 이상의 방법을 적용하기 위해서는 국가별 상황에 맞는 산정 방법을 새롭게 개발해야 하기 때문이다. 본 연구에서는 동일한 기준에 의한 과학적인 분석을 위하여 각 NIR의 내용을 대상으로 초지 바이오매스 부문에 대한 활용 자료와 적용된 방법을 IPCC 가이드라인의 기준에 따라 재분류하였다(Jeong et al., 2014; Han et al., 2017). IPCC 가이드라인의 Tier 분류는 활용되는 활동 자료의 속성을 포함하고 있으나, 초지 분야가 포함된 LULUCF에서는 기본 배출계수 및 단순 방정식으로부터 국가 고유의 자료 사용 및 국가 환경에 적합한 모형 적용까지의 수준에 의거하여 Tier를 채택하기 때문에 접근 수준을 직관적으로 파악할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 IPCC 가이드라인에서 제시된 기준에 따라 산정 방법(Tier)과 접근 수준(Approach)을 1부터 3의 수준으로 구분하여 적용하였다(Penman et al., 2003; IPCC, 2006; Lee et al., 2018; Lee et al., 2019) (Table 1).

Tier 1은 IPCC 가이드라인의 방법을 채택하여 초지 바이오매스의 연 변화가 0에 수렴하는 것으로 가정하여 산정 대상에서 제외시키는 경우, Tier 2는 초지 바이오매스가 온실가스 인벤토리에 포함됨과 동시에 국가고유계수를 개발하여 적용한 경우, 마지막으로 Tier 3는 장기적인 관측 자료에 기반한 시계열 모형을 개발하여 산정하는 경우로 구성된다. 일부 국가들의 LULUCF Tier는 세부 항목별로 상이한 방법이 적용되는 경우가 있는데, 이 경우에는 초지 바이오매스의 가장 큰 구성 요소인 살아 있는 바이

오매스에 대한 산정 방법을 기준으로 분류하였다. 접근 수준의 경우에는 국가 통계 자료를 활용하는 경우를 Approach 1로, 국가 통계 자료를 활용하고 있으나 과거와 현재의 변화가 확인되는 경우를 Approach 2로, 마지막으로 시계열 공간 자료를 적용한 경우를 Approach 3로 간주하였다(IPCC, 2003). LULUCF 분야의 활동 자료는 기후대와 토양형을 기준으로 세분화되는데, IPCC 가이드라인에서 제공하고 있는 기후대는 아한대, 한대-건조, 한대-습윤, 온대-건조, 온대-습윤, 열대-건조, 열대-습윤, 열대-다습, 열대-산림의 9개 분류군으로 구성된다. 기후대에 대한 언급이 따로 기재되지 않은 경우 자국 전체 면적을 단일 기후대로 간주하고 있음을 의미하고, 각국의 상황에 따라 세분류 기후대를 고려하는 경우 적용 방식에 차이가 있는 것으로 파악되었다. 토양형의 경우 HAC(High Activity Clay), LAC(Low Activity Clay), 사질토(Sandy), 화산회토(Volcanics), 습지토양(Wetland)의 5 유형으로 구분된다(IPCC, 1996a; IPCC, 1996b; Jabbagy & Jackson, 2000). 토양형은 적용 유무에 따라 NIR이 분류되며, 토양형을 적용하고 있는 모든 국가는 IPCC 가이드라인의 기준을 따르는 것으로 파악되었다.

## 2. Tier 2 산정 방법의 국내 적용 가능성 검토

국외 사례에서 도출된 주요 쟁점들의 국내 적용 가능성을 확인하기 위하여 국내에 분포하는 초지 바이오매스에 대한 현장 조사를 수행하였다. 현장 조사 대상지는 기후대, 토양형, 토지 이용 유형에 따른 차이를 규명하기 위하여 공간적 범위로 전국을 대상으로, 초지의 생육 특성을 균일하게 유지하기 위하여 30년 이상 목장으로 유지된 초지를 선정하였다. IPCC 가이드라인에서는 20년 간의 변화를 기본 시계열 범위로 권장하고 있으나, 국내의 초지는 조성 후 25년간 사용의무가 부과된다(초지법 제23조). 따라서 의무 부과 기간 이후에도 유지된 초지는 목장주의 관리 의지와 지속성의 측면에서 안정된 초지로 간주될 수 있고, 초지 바이오매스 변화에 미치는 영향들을 규명하기에 적합하다. 기후대의 경우 IPCC 가이드라인의 대분류 기후대 분류를 적용하는 경우 국내 전체가 단일 기후대로 간주되어 지역별 생산량 차이가 무시되는 문제가 발생한다. 본 연구에서는 지역별 생산량 차이를 규명하기 위하여 식생 분포의 영향을 고려한 홀드리지 생활대(Holdridge Life Zones)의 평균기온 기준을 적용하여 분류하였

Table 1. Classification and standards for calculation method and activity data levels of greenhouse gas inventory

Classification	Level	Criteria
Method	Tier 1	<ul style="list-style-type: none"> <li>The simplest method designed to use the equations and default variable values (emission and stock change coefficients) provided by the IPCC</li> <li>It is not spatially precise because it defines administrative statistical data for each country as the basic target, but could be applied globally</li> <li>In the grassland sector, basic emission factors and simple equations are applied</li> </ul>
	Tier 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>The same method as the Tier 1 is applied, but emission and stock change coefficients based on national and regional data are applied for land use and livestock categories</li> <li>Emission factors defined by country require a higher level of spatiotemporal resolution and granular activity data because it needs to be able to calculate more accurately for the country's climate region, land use system, and livestock category</li> <li>Tier 2 is subdivided into <i>a</i> and <i>b</i>, where <i>a</i> is based on area and <i>b</i> calculates carbon storage by population</li> <li>In the grassland sector, a method of developing and applying country-specific coefficients to the Tier 1 method is used.</li> </ul>
	Tier 3	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tier 3 is the highest level method where a time series model and inventory measurement system that can explain the detailed national environment using high-resolution activity data are applied</li> <li>The purpose of the method at this stage is to provide estimates with greater certainty relative to the lower Tiers. It should be accompanied by extensive field surveys repeated at regular intervals, a GIS system based on age, type/production data, soil data, land use and management activity data, and specific methods for integrating several types of monitoring activities</li> <li>Qualitative checks, screening, and verification must be performed on the applied model, and all processes must be thoroughly documented</li> <li>In the grassland field, a method of calculation is used by applying a model suitable for each country's environment</li> </ul>
Activity Data	Approach 1	<ul style="list-style-type: none"> <li>It is defined as the total area for each land use category, and no information is provided on changes in each category</li> </ul>
	Approach 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>The level at which changes in land use categories are expressed in matrix form to confirm specific quantitative changes in land use changes</li> </ul>
	Approach 3	<ul style="list-style-type: none"> <li>A level at which information equivalent to the Approach 2 is expressed as spatial data and points of change at the regional level can be confirmed</li> </ul>

고, 이에 의하면 국내 기후대는 냉대(1.33%), 온대(63.06%), 난대(35.61%)로 구성된다(Holdridge, 1967; Jung et al., 2003). 조사 대상지는 기후대 분류에 따라 선정하였으나, 목장주의 조사 동의를 구하는 과정에서의 어려움과 조사 과정에서 냉대 기후대와 난대 기후대의 초지 바이오매스 패턴이 다르게 나타나 추가 조사가 수행되었다. 이 과정에서 조사 대상지는 냉대 기후대 10개소, 온대 기후대 5개소, 난대 기후대 13개소로 구성되었고, 이용 유형에 따라서는 방목지 19개소, 섭식 직후 방목지 5개소, 채초지 4개소로 총 28개소에 대한 현장 조사를 수행하였다(Fig. 1). 본 연구에서 조사된 냉대 기후대 초지는 소를 방목하는 목장들로 산지 사면에 입지하여 상대적으로 면적은 좁고, 경사가 급해 채초지를 운영하지 않으며, 방목 강도가 높은 특성이 나타났다. 이에 따라 조사 대상지 반복수를 높여 관측값의 대표성을 얻고자 하였다. 난대 기후대 현장 조사지의 경우 채초지 운영 면적이 넓고, 공동 목장의 형태로 운영되는 특징이 있으며, 방목하는 가축 종류가 다양하기 때문에 대상지 비중을 높게 조사하였다(Choe, 2013; Bu et al., 2016).

현장 조사 사이트는 IPCC 가이드라인에서 제시한 토양형 중

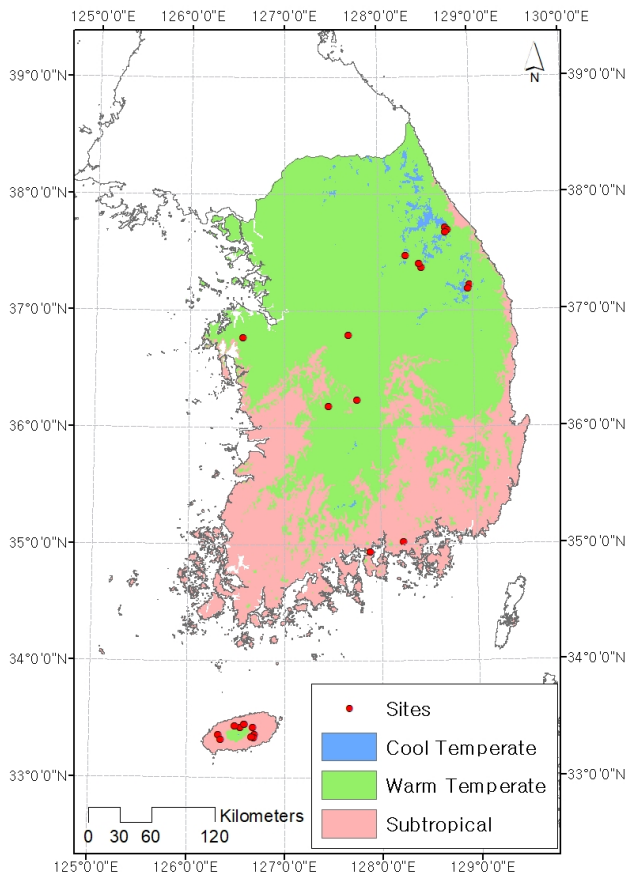


Fig. 1. Survey site location and climate zone classification map.

국내에 분포하는 HAC(High Activity Clay), LAC(Low Activity Clay), 사질토(Sandy), 화산회토(Volcanics)에 대한 값을 취득하기 위하여 농촌진흥청에서 파악한 국내 토양형 정보를 바탕으로 선정하였다(Rural Development Administration of Korea, 2011). 현장 조사 시기는 초본류의 생장이 완료된 6월부터 9월의 기간 내 수행되었으며, 방목지의 경우 방목 활동이 이루어지지 않아 최대 바이오매스량을 보존하고 있는 지점과 방목으로 인해 섭식되어 바이오매스량이 감소한 지점을 대상으로 하였다. 채초지의 경우 수확 활동이 이루어지지 않은 이탈리아 라이그라스 식재 지점을 샘플링하여 최대 바이오매스량을 산출하였다. 샘플링 방법은 현장 조사지 내 30 cm × 30 cm 크기의 방형구를 3 반복으로 설치하여 방형구 내에 생육하는 지상부와 지하부의 바이오매스를 채집하였다(Park et al., 1977; Bobbink and Willems, 1987). 각 샘플은 건조 과정을 거쳐 바이오매스에 포함된 수분을 완전히 제거하여 건조량을 측정하고, 원소분석기(Flash EA 1112, Thermo electron corporation, US)를 통해 탄소 함량을 분석하였다. 현장 조사를 통해 취득한 최대 바이오매스량과 탄소 함량을 이용하여 초본류 부위별 바이오매스 내 탄소량을 산정하여 국내 초지 바이오매스 발달 경향의 차이가 존재하는지 확인하였다. IPCC 가이드라인과 국외 사례의 기준에 따라 기후대, 이용 유형, 토양형에 따른 차이를 규명하였으며, 여러 집단의 평균 차이의 유의성을 검증하기 위해 일원배치 분산분석(One-way analysis of variance, ANOVA)을 활용하였다(St and Wold, 1989).

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 국외 NIR의 산정 체계 분류

초지 바이오매스에 대한 국가별 NIR을 분류한 결과, Tier 1은 24개국, Tier 2는 6개국, Tier 3는 0개국으로 나타났다(Table 2). 초지 분야는 LULUCF 내 타 분야에 비해 상대적으로 연구 수준이 낮은 것으로 평가되었다. LULUCF 중 가장 활발히 연구가 수행된 산림 분야에서는 Tier 1이 9개국, Tier 2가 15개국, Tier 3가 6개국인 것과는 대조적이다. 초지를 구성하는 토양과 바이오매스 세부 분야의 비교에 있어서도 바이오매스에 대한 산정 수준은 낮은 특징이 나타났다. 초지 토양 부문에 대한 산정 방법은 Tier 1이 13개국, Tier 2가 16개국, Tier 3가 1개국이기 때문에 바이오매스에 대한 관심이 상대적으로 낮음을 의미하는 것으로 볼 수 있다. 초지 바이오매스 부문의 접근 수준에 따라서는 Approach 1은 9개국, Approach 2는 16개국, Approach 3는 5개국인 것으로 분류되었다. 접근 수준의 경우 LULUCF 내 각 분야가 공통적으로 적용되는 경향이 있어 국가 간 차이는 존재하되 타 분야와

Table 2. Tier and Approach levels in grassland by country

Country	Grassland Area (1,000ha)*	Tier	Approach	Country	Grassland Area (1,000ha)*	Tier	Approach
Australia	395,407	1	3	USA	237,600	1	2
Austria	1,810	1	2	Bulgaria	1,891	1	2
Belgium	519	1	2	Czech	974	1	2
Canada	15390	1	2	Estonia	231	2	1
Denmark	345	2	2	Greece	4,600	1	1
Finland	26	1	2	Croatia	1,469	1	1
Germany	4,929	1	2	Hungary	1,057	1	2
Japan	944	1	2	Iceland	3,010	1	1
Netherlands	980	1	2	Lithuania	891	1	1
Norway	169	2	3	Latvia	629	1	1
Poland	3,387	1	2	Romania	4,685	1	3
Portugal	1,769	1	3	Slovakia	524	1	1
Sweden	1,200	1	1	Slovenia	305	2	3
Swiss	1,091	2	2	Turkey	14,617	1	2
UK	11,180	2	2	Ukraine	7,951	1	1

\* International Bank for Reconstruction and Development (<https://www.worldbank.org/en/who-we-are/ibrd>).

의 비교에서 변별력은 가지지 않는 것으로 분석되었다. 접근 수준을 구성하는 하위 범주인 기후대의 적용은 분류 수준에 따라 구분되는데, IPCC 가이드라인의 분류법을 채택한 경우 전 지구적 단위의 분류이기 때문에 국가 면적이 협소한 경우 단일 기후대로 간주되는 경향이 나타났다. 반면, 호주, 캐나다, 노르웨이, 스위스, 슬로베니아는 국가 내 기후대를 자국의 상황에 맞게 세분류하여 적용하고 있다. 토양형의 경우 IPCC 가이드라인의 분류 체계를 바이오매스에 동일하게 적용하고 있었으며, 각 국가의 토지피복을 토양형에 따라 분류한 국가는 핀란드, 노르웨이, 에스토니아, 슬로베니아의 4개국인 것으로 나타났다. 접근 수준은 활동 자료 구축 자료에 의존하는데, 각국의 NIR에서 나타난 바와 같이 전반적인 적용 수준이 낮은 것으로 평가되었다.

2. 국외 NIR에서 나타난 초지 바이오매스 부문 온실가스 인벤토리 산정 체계의 특징과 국내 적용의 주요 쟁점

국외 NIR 분석 결과 가장 빈도수가 높은 산정 방법은 Tier 1(80%)이었고, 접근 수준은 Approach 2 (53%)로 나타났다. 초지 바이오매스 부문은 국가별로 공간적 적용 범위, 산정 대상, 적용 방법의 측면에서 다양하였고, 낮은 수준의 Tier를 적용하였더라도 산정 대상의 세분류와 변수 항목에서 IPCC 가이드라인보다 개선된 내용이 포함되는 경우도 나타났다. 특히, 초지 바이오매스 변화량을 0으로 간주하고 있는 국가들의 NIR에서도 초지 유형 분류, 산정 방법, 관련 계수에 대한 내용이 일부 수록되어 있는

경우가 나타났다. 이런 점에서 미루어 볼 때, 초지 바이오매스 부문의 국제 정황은 각 국가의 필요에 의해 다양한 산정 체계의 적용을 통한 산정 방법이 개발중이거나 개선이 수행되는 과정에 있음을 의미하며, LULUCF 내 타 분야들이 상대적으로 정형화된 방법을 채택하고 있는 것과는 양상이 다른 것으로 분석되었다. 이는 초지 바이오매스의 변화량을 0으로 간주하는 IPCC 가이드라인의 Tier 1 방법이 산정식은 기재되어 있지 않으나 관련 기본 계수가 수록되어 활용이 가능하도록 구성되어 있는데, 이러한 정보를 바탕으로 각 국가들의 상황에 맞추어 초지 바이오매스 부문의 산정 체계를 구성한 결과로 판단된다. 이러한 측면에서 초지 바이오매스 부문에 대한 국제 동향을 파악하기 위해 Tier 2 이상의 산정 방법을 적용하고 있는 국가들과 더불어 Tier 1이 적용된 NIR에 수록된 개별적 특징을 함께 검토하였다. 주요 차이를 유발하는 항목들을 유형화한 결과, 1) 초지 이용 방법에 따라 초지를 구분하여 국가 고유계수를 개발하는지 여부, 2) 초지 공간 내 분포하는 목본 식생에 대한 산정을 수행하는지 여부, 3) 산불로 인한 손실량 및 회복량을 산정에 포함시키는지 여부, 4) 인간 활동에 의한 변화량이 산정되는지 여부로 도출되었다.

초지 이용 방법에 따른 차이를 적용하고 있는 국가는 호주, 오스트리아, 캐나다, 덴마크, 일본, 노르웨이, 스위스, 슬로베니아의 8개국으로 나타났다. 국가별로 세부 분류군의 구성에 차이는 있으나 초지를 세분류로 구분하여 국가고유계수를 개발하고 온실가스 인벤토리를 계산하는 특징이 동일하게 적용되고 있다. 초지 이용 방법에 대한 분류는 국가별로 다양하게 나타나는데, 호주의 경우

방목 강도와 관리 방법에 따라 방목지를 구분하고 채초지는 사료 수준에 대한 모델 수치를 매개 변수로 향후 산정하는 방식을 채택하고 있다. 오스트리아, 캐나다, 노르웨이, 스위스, 슬로베니아의 5개국은 자국의 상황에 따라 초지 유형을 세분류하였으며, 하위 분류 기준은 관리 유무 및 강도, 식생 밀도, 지형 조건에 의한 것으로 분석되었다. 또한, 덴마크와 일본 2개국은 방목지, 채초지, 야생 초지 분류법을 적용하고 있다. 이러한 국가들 중 초지 바이오매스의 산정 방법을 Tier 1 수준으로 적용하고 있는 호주, 오스트리아, 캐나다, 일본은 초지 바이오매스 탄소축적 변화가 없는 것으로 간주하고 있으나 세부 유형을 구분하고 있는 것으로 볼 때, 향후 더 높은 Tier를 적용하는 과정에서 활동 자료 및 국가고유계수를 단계적으로 적용하려는 것으로 판단된다. 국내의 경우 채초지와 방목지의 운영 비율과 이용 강도에 대한 시계열 통계가 없기 때문에 현재 시점에서 초지 이용 방법에 따른 바이오매스 변화를 추정하는 것은 한계가 있다. 국내의 초지는 이용되지 않아 산림화 된 초지, 채초지로 이용되는 초지, 방목지로 유지되는 초지로 구분할 수 있고, 목장용지의 이용 면적에 대한 자료는 농림축산식품부의 초지관리 실태조사를 통해 조사되고 있다(Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, 2023). 반면, 초지관리 실태조사는 초지의 시계열 면적 변화를 파악하기 위한 목적으로 수행되었기 때문에 LULUCF 분야에서 목표로 하는 공간 자료 기반의 산정에는 직접적으로 활용되기 어려운 문제가 있다.

초지의 초분류 외 임목 바이오매스를 초지 분야에 포함시켜 산정하고 있는 국가는 호주, 핀란드, 네덜란드, 스위스, 미국, 리투아니아, 라트비아, 루마니아, 슬로베니아의 9개국이었다. 초지의 정의와 공간적 적용 범위가 국가별로 상이하기 때문에 세부적인 방식에서는 차이가 있지만 초지 공간 내 분포하는 목본 식물(교목, 아교목, 관목)에 대한 탄소축적량을 추정하고 있다. 목본 식물에 대한 산정은 산림 분야에서 개발된 성장식 및 계수를 활용하는 방법과 초지 내 식물에 대한 현장 조사를 통해 계수를 개발하여 적용하는 방법의 두 가지가 혼재한다. 초지 내 분포하는 목본 식생은 균락을 형성하여 소규모 숲 섬의 형태로 분포하는 경우, 개체목 단위로 분포하는 경우, 산림과 유사한 형태로 분포하는 경우, 가로수 형태로 도로를 따라 분포하는 경우로 구분될 수 있다. 산림 유사형을 제외한 나머지 형태의 목본 식물은 일반적인 산림에서 도출되는 생장 패턴과 차이가 있기 때문에 과학적인 정량화를 위해서는 초지 내 목본 식생에 대한 현장 조사가 요구된다(Peichl et al., 2012). 국내 Tier 1 온실가스 인벤토리에서는 초지의 범주를 지적도 상 목장용지로 정의하고 있는데, 이 기준을 상위 Tier에서 동일하게 적용하면 목장용지 내 다양한 토지 피복에 대한 고려가 수반되어야 할 것이다.

산불로 인한 초지 손실량과 회복량을 온실가스 인벤토리에 포함하고 있는 국가는 호주, 영국, 리투아니아, 우크라이나의 4개국

으로 나타났다. 호주는 산불에 대한 가장 과학적인 방법을 적용하고 있는데, 이는 FullCAM 시스템을 통해 국토를 시공간적으로 관측하여 활동 자료로 활용하고 있는 점에 기인한다(Reichards and Evans, 2004). FullCAM 시스템은 LULUCF 전 분야에 대한 공간 활동 자료를 제공하고 있기 때문에 공간 정합성에 문제가 발생하지 않고, 토지 전용 및 획득-손실량을 공간적으로 정량화할 수 있는 장점이 있다(King et al., 2011). 또한, 산불로 인한 손실량에 더불어 자연 회복에 의해 발생하는 획득량을 유형화하여 계산하는 특징이 있다. 산불 발생 이후 잔존한 바이오매스의 비율에 따라 자연 회복 기간을 차별적으로 적용하는데, 초지에서 산불이 발생하여 40% 이상의 손실이 발생한 경우 60일에 걸쳐 회복되는 것으로 가정한다. 호주가 산불에 의한 획득-손실량이 체계적으로 구성되어 있는 반면, 대부분의 국가들은 토지 전용과 자연재해로 인한 분야별 획득량과 손실량 산정에 대한 활동 자료가 마련되어 있지 않거나 불확실성이 크기 때문에 적용에 어려움이 있다. 국내의 경우 토지 전용에 대한 국가 통계 자료의 수치가 동일하게 유지되지 않아 정합성에 문제가 야기될 수 있다. 게다가, 자연재해가 토지 피복 종류에 상관없이 복합적으로 발생함에도 불구하고 분야에 따라 피해 면적 및 바이오매스 손실량을 개별적으로 산정하고 있어 공간에 기반한 정확한 피해 면적을 확인하기 어려운 실정이다. 이러한 한계를 극복하기 위해서는 Approach 3 수준에 부합하는 공간화 된 시계열 활동 자료의 마련이 필수적일 것이다.

인간 활동에 의한 변화량을 고려하고 있는 국가는 호주, 오스트리아, 노르웨이, 폴란드, 스위스, 영국, 루마니아의 7개국이었다. 인간 활동은 초지의 관리 방법 및 강도를 탄소축적량 추정에 적용하는가 여부를 기준으로 분류되었다. NIR에서 확인된 구체적인 변수는 자연 및 인공 초지 여부, 비료-관개 유무, 초지 바이오매스 밀도, 방목 강도, 휴경 기간, 채초지의 경작 횟수, 초지 관리 수준이었다. 국내의 자료에서는 자연 및 인공 초지 분류와 초지 관리 수준을 제외한 나머지 항목들에 대한 자료 수집의 법적 근거 또는 제도가 마련되어 있지 않기 때문에 초지 온실가스 인벤토리에 적용 가능한 기준과 지침이 요구되는 상황이다. 특히, 국내 목장용지의 대부분은 사유지로 분류되고 있어 목장주들의 협조를 구하는데 어려움이 존재하기 때문에 제도적 절차를 통한 장기 모니터링 조사 체계의 확립이 요구된다.

### 3. 초지 바이오매스 온실가스 인벤토리의 주요 쟁점에 대한 국내 적용 가능성 검토

초지 바이오매스 부문에서 도출된 주요 쟁점 중 현 시점에서 확인 가능한 항목은 국내 목장용지 내 공간 구성과 초지 이용 유형에 따른 탄소량 차이가 존재하는지 여부이다. 자연재해의 경우

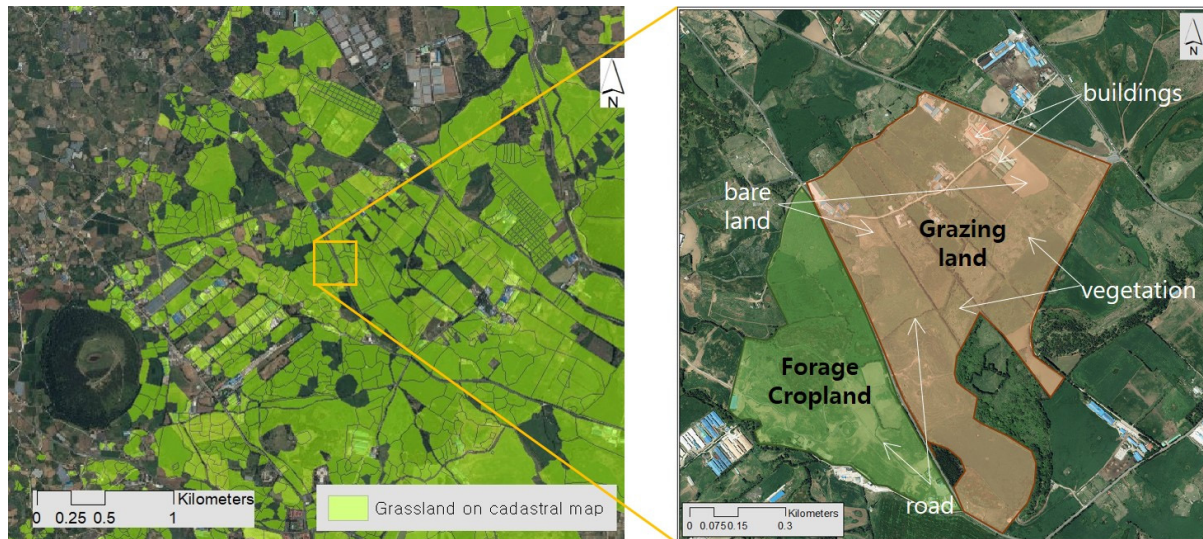


Fig. 2. Example of grassland classification and detailed land cover composition in Jeju island, Korea.

산불, 산사태에 대한 피해 범위가 산림 분야와 정주지 및 기타토지 분야를 중심으로 기록되어 있어 초지에서 자연재해에 받은 영향이 불확실했다. 또한, 초지의 공간적 대상이 되는 지적도 상 목장용지와 인간 활동에 대한 영향을 파악한 초지관리 실태조사 자료를 비교한 결과, 초지 분포가 불일치하고 있으며 이로 인해 관리 수준에 의한 영향을 확인할 수 없었다.

지적도의 목장용지를 기준으로 하였을 때, 위성영상을 통해 파악된 초지의 공간 구성은 초지, 입목 바이오매스, 나지, 건물, 도로의 요소로 이루어져 있다(Fig. 2). 초지의 탄소 흡수원으로써 기능하는 요소는 초지와 입목 바이오매스로 볼 수 있으며, 식생 구분에 의해 분류하면 교목·아교목, 관목, 하층식생으로 구분할 수 있다. 초분류가 우점하는 초지의 경우 이용 유형에 따라 채초지와 방목지로 구분되고, 국내 상황에서는 채초지와 방목지를 모두 운영하는 목장, 방목지만 운영하는 목장, 채초지와 방목지를 모두 운영하지 않는 목장으로 세분된다. 반면, 방목지와 채초지에 대한 토지 이용은 목장의 상황에 따라 면적의 변화가 갖게 발생하는데, 이용 유형에 따른 면적 변화를 탐지할 수 있는 시기별 자료가 없어 연 변화를 추정하기 어려운 한계가 존재한다. 국내의 경우 목장용지 내 입목 바이오매스, 나지, 건물, 도로에 대한 면적 추정은 LULUCF에서 수행하고 있는 영상 판독 방법을 통해 변화를 파악 가능한 반면, 방목지와 채초지의 운영 비율, 운영 체계에 대한 정보는 이를 통해 획득할 수 없다(Park et al., 2017). 국내에서는 초지 실태조사를 통하여 초지 현황을 파악하고 있지만 초지 바이오매스 부문 온실가스 인벤토리 산정의 수준을 현재보다 더 높이기 위해서는 세부적인 변화를 수집하는 정책 체계가 수립될 필요가 있다(Mcconkey et al., 2019).

초지 분포는 기후대와 토양형의 두 가지 기준을 적용하는 것이

Tier 2에서는 가장 높은 수준의 산정 체계로 분석되었다(Smith et al., 2012). 토양형의 경우 국외에서도 IPCC 가이드라인에서 제시한 분류 체계 외 새로운 체계를 적용한 사례를 찾을 수 없었으며 국내에서도 이 기준을 적용하는 것이 자료의 균질성을 유지하기 위해 타당할 것으로 판단된다. 반면, 기후대는 IPCC 가이드라인의 기준을 국내에 적용하게 되면, 단일 기후대로 간주되어 기후조건의 영향이 무시되는 문제가 있다(Park et al., 2018). 따라서 본 연구에서는 식생 분포를 잘 반영할 수 있는 기후대를 적용하여 기후대에 따른 초지 탄소량에 차이가 있는지 규명하였다. 그 결과 기후대에 따라 방목지 지상부와 지하부의 탄소량에 큰 차이가 나타나는 것을 확인하였다(Fig. 3). 냉대 기후대에서는 지하부의 탄소량이 높게 나타났고, 난대 기후대에서는 이와 반대로 지상

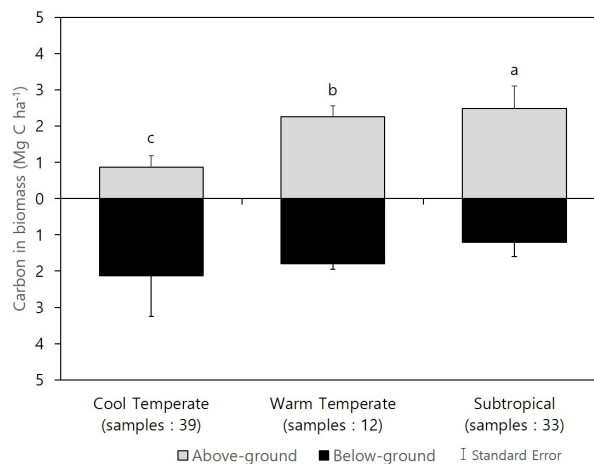


Fig. 3. Differences in carbon content for grassland biomass by climate zone; As a result of ANOVA analysis, there was a significant difference at the  $p < 0.001$  level.

부의 탄소량이 높게 나타나는 특징이 있었다. 온대 기후대의 지상부는 난대 기후대와 유사한 수준으로 나타났고, 지하부는 냉대와 난대 기후대의 중간 수준인 것으로 분석되었다. 일반적인 상황에서 초본류는 냉대 기후대로 갈수록 뿌리 발달이 우세해지는 특징이 나타나는데, 국내에서도 기후대에 따라 이러한 특징이 반영되고 있는 것이 확인되었다(Ma et al., 2008; Yang et al., 2010). 조사가 수행된 방목지는 인위적으로 식재된 목초 약 75%와 자연적으로 발생한 초본류 약 15% 비율로 조사되었다. 채초지는 이탈리아 라이그라스가 인위적으로 100% 식재된 지점에서 샘플링이 수행되었다. 현장 조사에서 취득한 자료를 초지 분야 온실가스 인벤토리에 적용할 수 있는 계수로 전환하면, 방목지의 최대 바이오매스량 평균을 기준으로 냉대 기후대는 지상부 0.87 Mg C ha<sup>-1</sup>(± 0.31), 지하부 2.13 Mg C ha<sup>-1</sup>(± 1.12), 온대 기후대는 지상부 2.25 Mg C ha<sup>-1</sup>(± 0.30), 지하부 1.79 Mg C ha<sup>-1</sup>(± 0.15), 난대 기후대는 지상부 2.48 Mg C ha<sup>-1</sup>(± 0.62), 지하부 1.20 Mg C ha<sup>-1</sup>(± 0.39)로 분석되었다. IPCC 가이드라인에서 제안한 최대 바이오매스량과 탄소 함량을 통해 계산한 기본 계수가 지상부 1.26 Mg C ha<sup>-1</sup>, 지하부 5.07 Mg C ha<sup>-1</sup>인 것을 감안하면, Tier 2 이상의 온실가스 산정을 위해서는 기후대별로 구분된 국가고유계수의 적용이 수반되어야 함이 확인되었다.

초지는 인간에 의한 토지 이용에 따라 방목지, 가축에 의한 섭식이 수행된 방목지, 채초지로 세분되는데, 국내 분포하는 이용 유형에 따라 차이가 나타나는 것을 확인하였다(Fig. 4). 방목지에서 가축 섭식에 의해 영향을 받는 탄소량은 초본류의 부위와 상관없이 발생하는 것으로 나타났다. 지하부 바이오매스의 감소는 현장 조사 시 확인된 가축의 답압에 의한 훼손으로 인한 것으로

판단된다. 본 연구에서 조사된 섭식 방형구는 높은 방목 강도가 나타났고, 경사가 있는 지형에 입지하여 가축의 반복적 이동을 통해 지하부 바이오매스가 지상부로 노출되는 수준의 환경이 조성되어 있었다. 국내의 기존 방목 강도 연구가 초지의 생산성, 사료 가치에 집중되어 있는 측면이 있기 때문에 방목 강도와 탄소축적량 관계에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다(Seo, 1990; Seo et al., 1996; Seong et al., 2016). 채초지는 지상부 바이오매스 탄소량이 높고, 지하부는 낮은 특징이 나타났는데, 이는 방목지에서 나타난 패턴과는 대조적이다. 이에 따라 온실가스 인벤토리 산정에 활용되는 뿌리함량비(Root-shoot ratio, R)가 방목지는 1.26인 것에 비해, 채초지에서는 0.28로 수준으로 낮아지는 것으로 분석되었다. IPCC 가이드라인에서 제안한 뿌리함량비가 4.0으로 상당히 높은 값을 제시하고 있는데, 국내에서는 냉대 기후대의 방목지에서만 이에 근접한 4.13의 값이 나타났다. IPCC 가이드라인의 기본 계수와 기후대에 따른 식생별 계수 비교 연구에서도 이와 유사하게 편차가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다(Mokany et al., 2006). 따라서 IPCC 기본 계수는 국내 초지 상황과는 다소 차이가 나타날 수 있으며, 과학적인 정량화를 위해서는 국가고유계수의 개발과 적용이 수반되어야 한다.

토양형별 초지 바이오매스 내 탄소량에서는 HAC, LAC, 사질토에서 유사한 패턴과 값이 나타났고, 화산회토에서는 이와 뚜렷하게 구별되는 특징이 나타났다(Fig. 5). 화산회토의 초지 생육 패턴이 토양형에 의존하여 차이가 발생하는지 여부를 확인하기 위하여 난대 기후대에서 수집된 HAC 토양 결과와 비교하였다. 난대 기후대의 HAC 토양은 지상부 0.48 Mg C ha<sup>-1</sup>(± 0.14), 지하부 0.95 Mg C ha<sup>-1</sup>(± 0.29)로 뿌리함량비가 2.57인 반면, 화산

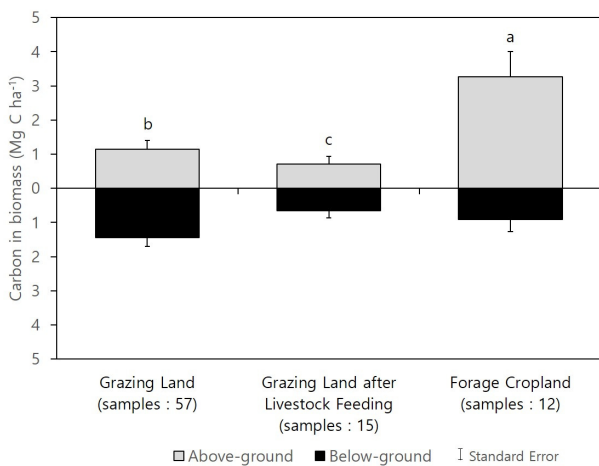


Fig. 4. Differences in carbon content for biomass by grassland use type; As a result of ANOVA analysis, there was a significant difference at the  $p < 0.001$  level for above-ground, and  $p < 0.009$  level for below-ground.

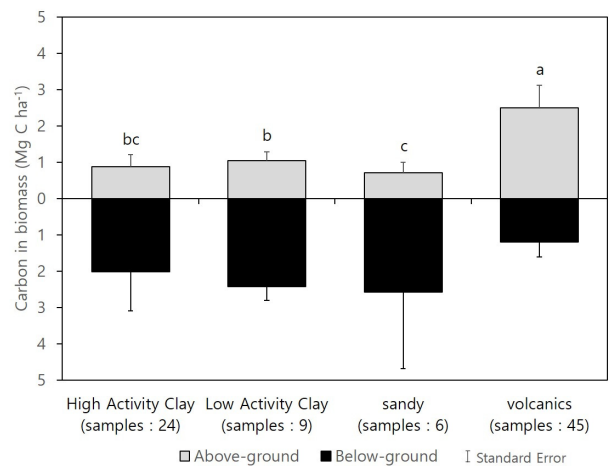


Fig. 5. Differences in carbon content for grassland biomass by soil type; As a result of ANOVA analysis, there was a significant difference at the  $p < 0.001$  level.



회토는 지상부 2.48 Mg C ha<sup>-1</sup>(± 0.62), 지하부 1.20 Mg C ha<sup>-1</sup>(± 0.39)로 뿌리함량비 0.66으로 뚜렷이 구분되었다. 토양형에 따른 부위별 탄소량을 살펴보면, HAC는 지상부 0.86 Mg C ha<sup>-1</sup>(± 0.33), 지하부 2.00 Mg C ha<sup>-1</sup>(± 1.08), LAC는 지상부 1.04 Mg C ha<sup>-1</sup>(± 0.23), 지하부 2.43 Mg C ha<sup>-1</sup>(± 0.36), 사질토는 지상부 0.70 Mg C ha<sup>-1</sup>(± 0.29), 지하부 2.57 Mg C ha<sup>-1</sup>(± 2.10), 그리고 화산회토는 지상부 2.48 Mg C ha<sup>-1</sup>(± 0.62), 지하부 1.20 Mg C ha<sup>-1</sup>(± 0.39)의 탄소량이 산정되었다. 국내 분포하고 있는 대부분의 화산회토가 제주도에 분포하고 있기 때문에 기후대에 따른 초지 부위별 바이오매스 탄소량(Fig. 2)과 유사한 형태의 결과가 나타났다. 토양형에서 가장 시급히 개선되어야 하는 점은 토양통 자료를 기반으로 작성한 토양형 공간 자료와 현장 토양 정보의 일치성을 달성하는 것이다. 토양통은 모재의 특성에 따라 토양 연접군과 면적 비율로 토양 유형을 구분한 자료이기 때문에 IPCC에서 제안한 구성 성분을 기준으로 분류되는 토양형과 불일치가 발생한다(Jung et al., 2015; Park et al., 2016). 또한, 본 연구의 대상지를 토양형에 의거하여 분류한 후 기후대와 토양형별 샘플 수를 균일하게 설계하였으나, 현장 조사에서 채집한 토양 성분 분석 결과가 토양형 공간 자료와 상이하는 문제가 발생하여 샘플 수가 편중되는 한계가 나타났다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 LULUCF에 공통적으로 적용될 수 있는 공간 활동자료가 시급히 마련되어야 하며, 과학적 정확도가 높은 양질의 자료가 생산되어야 할 것이다.

#### IV. 요약

본 연구는 초지 바이오매스 부문에 대한 국제적 경향과 이를 통한 국내 적용 가능성을 검토하기 위해 수행되었다. 초지 분야는 LULUCF 내 타 분야에 비해 상대적으로 연구 수준이 낮은 편으로 UNFCCC에 보고된 각 국가별 NIR을 기준으로 Approach 2 수준의 Tier 1 방법이 가장 높은 빈도로 적용되고 있었다. IPCC 가이드라인의 Tier 1 방법에서 초지 바이오매스 부문은 연 변화량을 0으로 간주하기 때문에 LULUCF 타 분야에 비해 정형화된 기본 체계가 없이 국가 상황에 따른 다양한 산정 방법을 적용하는 특징이 나타났다. 국내 초지 바이오매스에 대한 Tier 2 이상의 방법에 적용 가능한 산정 방법을 항목별로 분류하면, 인간에 의한 초지 이용 유형을 구분하는지, 초지 내 목본 식생을 포함하는지, 재해로 인한 손실량을 산정하는지, 초지 관리 방법에 따른 차이를 적용하는지 여부였다. 각 항목에서 발생하는 유의미한 차이가 국내에 적용할 수 있는지를 확인하기 위하여 국내를 대상으로 현장 조사와 활동 자료 분석을 수행하였다. 현 시점에서 국내에서 확인 가능한 항목은 초지의 정의에 따른 공간 구성과 이용 유형에 따

른 탄소량 차이로 나타났다. 연구 결과, 이용 유형에 따라서 방목지, 섭식이 수행된 방목지, 채초지에서 바이오매스 탄소량의 유의미한 차이가 나타났고, 기후대, 토양형에 따른 차이도 존재하고 있었다. 따라서 IPCC 가이드라인의 기후대와 토양형을 기준으로 한 세분류가 국내에서도 타당한 초지 분류 체계로 적용될 수 있는 것으로 분석되었다. 반면, 초지 바이오매스 부문에서 활용 가능한 국가 공간 자료와 현장 자료의 불일치성이 지나치게 높아 전국 단위의 적용은 신뢰도가 낮은 상황이다. 국제 동향에서 나타난 주요 함의를 국내의 상황과 비교하였을 때, 초지 분야에 대한 더 높은 수준의 온실가스 인벤토리 작성을 위해서는 기후대-토양형 유형에 대한 국가고유계수 개발과 더불어 활용 가능한 공간 자료의 마련과 이를 뒷받침할 수 있는 정책 및 제도 체계가 시급히 마련되어야 할 것이다.

#### V. 시사

본 연구는 농촌진흥청 신농업기후변화대응체계구축사업(PJ0149 23022023)의 지원에 의해 이루어진 것임.

#### VI. REFERENCES

- Bobbink, R. and Willems, J.H. 1987. Increasing dominance of *Brachypodium pinnatum* (L.) Beauv. in chalk grasslands: A threat to a species-rich ecosystem. *Biological Conservation*. 40(4):301-314.
- Bu, H.J., Kand, C.H. and Jeong, K.J. 2016. A study on the living conditions of locals through the management of village common pastures and pasturing activities in Gotjawal located in the mid-mountain area of Jeju island. *The Korean Association of Regional Geographers*. 22(2):353-368.
- Choe, H. 2013. Redefining common pool resource and the case of common meadows in Jeju island. *Economy and Society*. 12-39.
- Chou, W.W., Silver, W.L., Jackson, R.D., Thompson, A.W. and Allen-Diaz, B. 2008. The sensitivity of annual grassland carbon cycling to the quantity and timing of rainfall. *Global Change Biology*. 14(6):1382-1394.
- Fan, J., Zhong, H., Harris, W., Yu, G., Wang, S., Hu, Z. and Yue, Y. 2008. Carbon storage in the grasslands of China based on field measurements of above-and below-ground biomass. *Climatic Change*. 86:375-396.
- Ghosh, P.K. and Mahanta, S.K. 2014. Carbon sequestration in grassland systems. *Range Management and Agroforestry*. 35(2):173-181.
- Go, E.J. and Oh, C.Y. 2019. Development and research on pottery

- glaze using soils in Jeju(volcanic ash soils, non-volcanic ash soils). *Korea Society of Ceramic Art.* 16(3):37-62.
- Greenhouse Gas Inventory and Research Center. 2019. National greenhouse gas inventory report of Korea.
- Han, S.H., Lee, S.J., Chang, H., Kim, S., Kim, R., Jeon, E.C. and Son, Y. 2017. Priority for developing emission factors and quantitative assessment in the forestry sector. *Journal of Climate Change Research.* 8(3):239-245.
- Holdridge, L.R. 1967. Life zone ecology. *Life Zone Ecology.*
- IPCC and Houghton, J.T. 1996. Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Greenhouse gas inventory workbook. OECD.
- IPCC. 1996. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. IPCC.
- IPCC. 2003. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. In: J. Penman, M. Gytarsky, T. Hiraishi, T. Krug, D. Kruger, R. Pipatti, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe and F. Wagner (Eds.), Hayama: IPCC/IGES.
- IPCC. 2006. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories (Vol. 4): Agriculture, forestry and other land use. Hayama: IPCC/IGES. p. 83.
- IPCC. 2019. 2019 Refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories (Vol.4): Agriculture, forestry and other land use. IPCC (Advance version). p. 68.
- Jabagay, E.G. and Jackson, R.B. 2000. Below-ground processes and global change. *Ecol. Appl.* 10:423-436.
- Jeong, H.C., Lee, J.S., Choi, E.J., Kim, G.Y., Seo, S.U. and So, K.H. 2014. A comparison of the changes of greenhouse gas emissions to the develop country-specific emission factors and scaling factors in agricultural sector. *Journal of Climate Change Research.* 5(4):349-357.
- Jung, H.C., Jeon, S.W., Lee, D.K. and Matsuoka, Y. 2003. Evaluation of vegetation adaptability to climate change on the Korean peninsula using forest moving velocity. *Journal of Environmental Impact Assessment.* 12(5):383-393.
- King, K.J., De Ligt, R.M. and Cary, G.J. 2011. Fire and carbon dynamics under climate change in South-eastern Australia: Insights from FullCAM and FIRESCAPE modelling. *International Journal of Wildland Fire.* 20(4):563-577.
- Lee, G., Lee, W.K., Kim, Y., Jyung, D. and Choi, H. 2019. Establishment of a long-term roadmap for calculating and reducing urban greenhouse gases and development of national land and urban planning systems and platform technologies. Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
- Lee, S.J., Lim, J.S. and Kang, J.T. 2019. Standard carbon sequestration of major forest tree species (ver. 1.2). National Institute of Forest Science.
- Lee, W.K., Son, Y., Ham, B., Cha, S., Ha, R., Park, S., Lee, S., Ko, Y., Kim, H. and Kim, G. 2020. Study on settlement management policy direction to respond to climate change. Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
- Lee, W.K., Son, Y., Jeon, S., Ham, B., Kim, M., Choi, S., Roh, Y., Song, C., Park, E., Han, S., Kim, S., Chang, H., Kim, H., Kim, J., Hong, M. and Hwang, J. 2018. A study on calculating greenhouse gas statistics in settlements based on land use. Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
- Ma, W., Yang, Y., He, J., Zeng, H. and Fang, J. 2008. Above-and belowground biomass in relation to environmental factors in temperate grasslands, Inner Mongolia. *Science in China Series C: Life Sciences.* 51(3):263-270.
- Mcconkey, B., Ogle, S.M., Chirinda, N., Kishimoto, A.W.M., Baldock, J. and Trunov, A. 2019. Grassland. IPCC.
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. 2023. 2022 grassland management survey.
- Mokany, K., Raison, R.J. and Prokushkin, A.S. 2006. Critical analysis of root: shoot ratios in terrestrial biomes. *Global Change Biology.* 12(1):84-96.
- Park, J.W., Na, H.S. and Yim, J.S. 2017. Comparison of Land-Use change assessment methods for greenhouse gas inventory in land sector. *Journal of Climate Change Research.* 8(4):329-337.
- Park, S.J., Lee, C.H. and Kim, M.S. 2018. The analysis of Greenhouse Gases Emission of cropland sector applying the 2006 IPCC guideline. *Journal of Climate Change Research.* 9(4):445-452.
- Park, S.J., Lee, C.H., Kim, M.S., Yun, S.G., Kim, Y.H. and Ko, B.G. 2016. Calculation of GHGs emission from LULUCF-cropland sector in South Korea. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer.* 49(6):826-831.
- Park, S.J., Reinbergs, E. and Song, L.S.P. 1977. Grain yield and its components in spring barley under row and hill plot conditions. *Euphytica.* 26:521-526.
- Peichl, M., Leava, N.A. and Kiely, G. 2012. Above-and belowground ecosystem biomass, carbon and nitrogen allocation in recently afforested grassland and adjacent intensively managed grassland. *Plant and Soil.* 350:281-296.
- Penman, J., Gytarsky, M., Hiraishi, T., Krug, T., Kruger, D., Pipatti, R., ... and Wagner, F. 2003. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry.
- Richards, G.P. and Evans, D.M. 2004. Development of a carbon accounting model (FullCAM Vers. 1.0) for the Australian

- continent. *Australian Forestry*. 67(4):277-283.
- Rural Development Administration of Korea. 2011. Taxonomical classification of Korean soils.
- Seo, S. 1990. Effect of grazing intensity during mid-summer season on the grass regrowth, utilization efficiency and botanical composition in pasture. *Korean Society of Animal Science and Technology*. 32(5):291-295.
- Seo, S., Shine, J.S. and Lee, J.K. 1996. Effect of grazing stage and intensity on the forage production and nutritive value in Orchardgrass dominant pasture. *The Korean Society of Grassland and Forage Science*. 16(1):53-60.
- Seong, H.J., Jang, S.Y., Oh, M.R., Tang, Y.J., Ding, Y.L., Kim, S.W., Choi, G.J., Jeon, B.T. and Moon, S.H. 2016. Changes in feed value, forage productivity, and grazing intensity at mountainous pasture grazed by growing Korean native goat. *Korean Society of Grassland and Forage Science*. 36(2):109-114.
- Smith, P., Davies, C.A., Ogle, S., Zanchi, G., Bellarby, J., Bird, N., Boddey, R.M., McNamara, N.P., Powlson, D., et al. 2012. Towards an integrated global framework to assess the impacts of land use and management change on soil carbon: Current capability and future vision. *Global Change Biology*. 18(7):2089-2101.
- Son, Y.M., Lee, K.H., Kim, R.H., Pyo, J., Kim, S.W., Lee, S.J. and Park, H. 2014. Carbon emission factors and biomass allometric equations by species in Korea. *National Institute of Forest Science*.
- St, L. and Wold, S. 1989. Analysis of variance (ANOVA). *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 6(4):259-272.
- Xia, J., Liu, S., Liang, S., Chen, Y., Xu, W. and Yuan, W. 2014. Spatio-temporal patterns and climate variables controlling of biomass carbon stock of global grassland ecosystems from 1982 to 2006. *Remote Sensing*. 6(3):1783-1802.
- Yang, Y., Fang, J., Ma, W., Guo, D. and Mohammad, A. 2010. Large-scale pattern of biomass partitioning across China's grasslands. *Global Ecology and Biogeography*. 19(2):268-277.

(Received : October 30, 2023 | Revised : December 26, 2023 | Accepted : December 26, 2023)