

국내 온실가스 인벤토리 개선을 위한 초지의 범위 분석

황진후* · 에네렐** · 김유준*** · 이은선** · 김민지** · 정시원*** · 하에스더*** · 유영재* · 전성우****†

*고려대학교 오정리질리언스연구원 연구교수, **고려대학교 환경생태공학과 박사과정학생,

고려대학교 환경생태공학과 석사과정학생, *고려대학교 환경생태공학부 교수

Role of grasslands for enhancement of greenhouse gas inventory in Korea

Hwang, Jinhoo* · Enerel, Bayarmagnai** · Kim, Yoojun*** · Lee, Eunsun** · Kim, Minji** ·

Jeong, Siwon*** · Ha, Esther*** · Yoo, Youngjae* and Jeon, Seongwoo****†

*Research Professor, Ojeong Resilience Institute, Korea University, Seoul, Korea

**Doctoral Student, Division of Environmental Science & Ecological Engineering, Korea University, Seoul, Korea

***Master Student, Division of Environmental Science & Ecological Engineering, Korea University, Seoul, Korea

****Professor, Division of Environmental Science & Ecological Engineering, Korea University, Seoul, Korea

ABSTRACT

This study investigates the role of natural grasslands in Korea as carbon sinks and their potential inclusion in the national greenhouse gas (GHG) inventory. The Land Use, Land Use Change, and Forestry sector is vital for emitting and absorbing greenhouse gases, requiring an accurate inventory for effective climate policies. In Korea, current GHG grassland inventories focus solely on pasture sites, defined by the grassland law, using spatial data from the Korea Land and Geospatial Information Corporation (LX) map, reflecting land use. This narrow definition excludes natural grasslands and significant carbon sinks, resulting in gaps that violate the Transparency, Accuracy, Consistency, Comparability, and Completeness principle. Our analysis shows that the LX map identifies 542.74 km² of ranch land, while the mid-level land cover map includes 7,974.29 km² of grassland, of which 205.64 km² are classified as natural. These differences highlight the underrepresentation of natural grasslands, contributing to carbon sequestration through soil organic carbon (SOC) and biomass storage. Notably, only 2.48 km² of natural grasslands overlap with ranch land. This study emphasizes the need for independent coefficients and methodologies for natural grasslands, ensuring their inclusion in GHG inventories. Expanding the scope to cover natural grasslands could enhance Korea's climate change mitigation efforts by accurately reflecting their carbon sequestration potential and providing a more comprehensive basis for national carbon accounting.

Key words : Carbon Sequestration, Greenhouse Gas Inventory, Land Cover Map, Natural Grasslands, Spatial Information

1. 서론

기후변화는 현대 사회에서 더 이상 외면할 수 없는 중대한 문제로 부각되고 있다(Oreskes, 2004). IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 제6차 평가 보고서에 따르면, 2011 ~ 2020년의 지구 표면 온도는

1850 ~ 1900년보다 0.95 ~ 1.20°C 더 높았으며, 이는 주로 인간 활동으로 인한 온실가스 배출의 결과이다. 2019년 전 세계 온실가스 배출량은 약 60 GtCO₂에 달했으며, 이는 2010년 대비 약 12% 증가한 수치로, 인간 활동에 의한 온실가스 배출은 계속해서 증가하고 있다(IPCC, 2023). 이러한 기후변화에 대응하기 위해서는 온실가스 감축 및

†Corresponding author : cepps_korea@korea.ac.kr (Korea University, 145 Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul, 02841, Korea. Tel. +82-2-3290-3043)

ORCID 황진후 0000-0002-5372-5377
에네렐 0000-0003-4784-0202
김유준 0009-0001-5273-3922
이은선 0000-0002-7624-4250
김민지 0009-0008-4608-4808

정시원 0009-0009-0966-6494
하에스더 0009-0007-2696-1896
유영재 0000-0003-0595-3911
전성우 0000-0001-5928-8510

기후변화 적응과 같은 다양한 정책이 요구된다(Hsieh and Yeh, 2024; Smit and Wandel, 2006). 특히, 파리협정 이후, 각국은 자발적 온실가스 감축 목표를 제시하였으며, 해당 목표의 이행과 점검이 필수적으로 요구되고 있다. 또한, 국제 사회에서도 정확한 온실가스 배출 및 흡수량을 산정하고 이를 보고하려는 노력이 이루어지고 있다. 이처럼 기후변화와 국제 사회의 요구에 대응하여 정책을 수립하고 실행하기 위해서는 온실가스 배출원 및 흡수원을 철저히 파악하고, 온실가스 인벤토리를 정확하게 산정하는 것이 중요하다(Bornmann et al., 2022; Kang et al., 2024; Olivier et al., 2005; Umemiya et al., 2017).

온실가스 인벤토리는 에너지, 산업공정, 농업, 토지이용·토지이용 변화 및 임업(LULUCF, Land Use, Land-Use Change, and Forestry), 폐기물의 5개 대분류로 나뉜다. 이중 LULUCF 부문은 다른 온실가스 인벤토리 부문과 달리, 생산량이나 사용량을 기준으로 배출·흡수 계수를 적용하지 않고, IPCC 지침에 따라 탄소 저장고(입목 바이오매스, 고사목, 낙엽층, 토양 유기탄소 등)별 탄소저장량의 시계열 변화를 기반으로 온실가스 배출량과 흡수량을 산정한다(Choi et al., 2022; IPCC, 2006). 특히, LULUCF는 온실가스를 흡수하고 저장할 수 있는 유일한 부분으로, 국가의 온실가스 감축 목표 달성에서 매우 중요한 역할을 한다. LULUCF 분야에서는 국토의 면적을 산림, 농경지, 초지, 습지, 정주지, 기타토지의 6개의 생태계 유형으로 나누고 해당 유형에 맞는 관장기관 및 산정기관에서 온실가스 통계를 산정하고 있다. 또한, 일관성 있는 토지이용 산정을 위해 MRV (Monitoring, Reporting and Verification) 체계에 맞는 산정체계를 구축하고 있다(IPCC, 2006). 우리나라는 IPCC 기준에 맞춰 기존 국가 통계의 토지이용 구분 항목을 재분류하여 이를 활용하고 있다(GIR, 2021).

본 연구에서는 이러한 여러 토지이용 유형 중 초지의 역할과 중요성에 주목하고자 한다. IPCC는 초지를 산림지보다 낮은 식생을 가진 방목지와 목초지로 정의하며, 농경지로 간주되지 않는 지역을 초지로 분류한다(IPCC, 2006). 초본 식물이 대기 중의 이산화탄소를 흡수하고 이를 바이오매스로 저장하며, 토양은 탄소를 유기물 형태로 축적하여 탄소 순환 과정에서 중요한 역할을 수행한다(Lorenz and Lal, 2018). 이러한 초지의 탄소 저장 능력은 전 세계 육상 탄소 저장량의 약 34%를 차지할 정도로 주목받고 있다(White et al., 2000). 다양한 연구에서는 초본식물 및 토양 등 초지의 여러 요소가 기후변화 완화에

기여할 수 있는 잠재력을 보여주었다(Chang et al., 2015; Deng et al., 2022; Ghosh and Mahanta, 2014; Li et al., 2023).

초지 생태계에서 탄소의 90%는 지하부 바이오매스(below-ground biomass)와 토양 유기탄소(Soil Organic Carbon, SOC)에 저장된다. 이러한 특성 덕분에 초지는 중요한 토양 탄소흡수원 역할을 하며, 초지 유형, 토양 특성, 기후 조건에 따라 SOC 축적량이 달라진다(Bai and Cotrufo, 2022). 특히, 다양한 식물의 존재와 미생물의 분해 및 동화 작용이 SOC 축적에 중요한 기여를 한다. 국내 연구에서도 초지 생태계가 산림 생태계와 유사한 SOC를 저장하고 있음이 확인되었으며(Jang et al., 2023), 초지는 이산화탄소, 이산화질소, 메탄과 같은 온실가스를 순환시키는 중요한 역할을 한다(Soussana et al., 2004). 이로 인해 초지는 전 세계적으로 온실가스를 완화할 수 있는 잠재력을 가진 생태계로 평가되며(Lal, 2010), 종 다양성이 높을수록 탄소 저장량이 증가하는 경향이 있다. 특히, 자연초지는 관리된 초지보다 더 다양한 식물종이 서식하기 때문에 중요한 탄소흡수원으로 평가된다.

국내에서도 초지 분야의 온실가스 인벤토리 산정이 이루어지고 있으나, 그 수준은 높지 않다. 현재 초지 인벤토리는 Tier 1 산정 방법과 Approach 1 접근 수준을 기준으로 산정되고 있으며, 입목 바이오매스와 토양 탄소를 초지 분야 인벤토리의 탄소 저장고로 정하고 그 축적량 변화를 바탕으로 연간 이산화탄소 흡수량을 산정하고 있다. 초지의 입목 바이오매스 탄소 저장량 변화는 IPCC의 Tier 1 (GPG 2003) 방법론에 따라 연간 탄소 축적변화가 없다고 가정하여 '0'으로 산정되며, 토양의 탄소 저장량 변화는 IPCC GPG-LULUCF 2003 지침의 기본값을 적용해 산정하고 있다(GIR, 2023; IPCC, 2003).

현재 국내 온실가스 인벤토리에서 초지 산정 시, 활동 자료로는 Approach 1 수준인 지적통계의 '목장용지' 면적이 사용되고 있다. 국내 초지법에서는 초지를 다년생 개량목초의 재배지, 사료작물 재배지, 목장 도로 및 부대시설 용지로 정의하고 있다. IPCC 가이드라인(IPCC, 2006)에서는 초지를 농경지로 분류하지 않는 방목장과 목초지, 그리고 산림으로 성장하기 어려운 초본식물이 우점하는 토지로 정의하며, 황무지나 휴양지뿐만 아니라 작물 재배와 식림-목초 체계 등을 포괄한다. 이러한 초지의 정의와 유형은 각국의 상황과 환경에 맞게 다르게 정의되지만, 전반적으로 폭넓은 범위를 포함하는 경향이 있다. 예를 들어, 미국은 목초지와 초원지대, 야생초원(다년생 목초

지, 침식된 초지, 재배 후 버려진 초지)뿐만 아니라 사바나, 사막, 툰드라를 초지로 간주한다(EPA, 2022). 일본은 목초지, 방목지, 야생초원을 포함한다(NIES, 2022). 독일은 초원, 준자연지역, 관목지, 황무지를 포함하며(UBA, 2022), 핀란드는 초본류가 포함된 넓은 초원, 농경지와 연계된 도랑, 바이오에너지 생산지, 그리고 버려진 경작지까지 초지로 정의하고 모든 초지를 관리된 토지로 간주한다(Statistics Finland, 2022). 호주와 뉴질랜드 역시 초지의 범위를 폭넓게 설정하며, 특히 뉴질랜드는 고생산성과 저생산성을 기준으로 초지를 세분화하여 관리한다(DCCEEW, 2022; MfE, 2022). 이처럼 IPCC의 국제 기준 및 각국의 초지의 정의는 국내 기준과 비교하여 단순히 방목용 초지 외 야생 초지 등을 포함하고 있는 등 상대적으로 포괄적이며, 이는 우리나라 초지 면적 산정 시 누락이나 불일치를 초래할 가능성을 내포한다. 국내의 초지의 정의를 기존보다 확장하고 토지피복 개념의 자연초지를 포함하는 보다 완전한 기준을 채택한다면, 초지 면적 산정의 완전성을 강화할 수 있을 것이다.

현재 우리나라의 인벤토리는 산림지, 농경지의 경우 토지피복을, 나머지 초지, 습지, 정주지의 경우 토지이용을 기반으로 하는 통계를 적용하고 있다. 산림지는 임업통계 연보, 농경지는 농업면적조사를 근거로 하고 있으며, 초지, 습지, 정주지는 지적통계 기반으로 작성되고 있다. 최근에는 통계 기반인 Approach 1에서 공간 기반의 Approach 3 수준으로의 전환을 준비하고 있으며 이는 더 높은 수준의 정밀성과 공간적 세분화를 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 다만, 토지 유형별로 토지피복과 토지이용이 혼합되어 사용되고 있으며, 각 정의와 공간구획의 차이로 인해 공간화 과정에서 중첩 및 누락 등의 문제점이 발생할 수 있는 가능성이 있다.

초지 부문 공간 단위 온실가스 인벤토리 산정을 위한 공간정보로는 크게 LX맵(Korea Land and Geospatial InformatiX Corporation Map, 지적도)과 토지피복지도가 있다. 토지이용 측면이 강한 공간정보인 LX맵의 지목 상 목장용지는 공간정보의 구축 및 관리 등에 관한 법률에 의거하여 축산업 및 낙농업을 위해 초지를 조성한 토지로, 축산법에 따른 가축을 사육하는 축사 등의 부지와 연결된 부속시설물의 부지를 포함한다. 반면, 토지피복의 특성이 강한 토지피복지도에서는 토지피복지도 작성 지침에 따라 대분류 수준에서는 초지를 초본식물로 덮인 토지로 정의하며, 자연초지와 인공초지로 구분하고 있다. 중분류 이하에서는 자연초지는 자연적으로 발생한 초지

로 임목이 10% 미만인 경우를 포함하며, 인공초지는 골프장, 묘지, 사료작물재배지 등을 포함한다. 현재 국내 초지 부문 온실가스 산정 기관인 국립축산과학원에서는 LX맵의 목장용지에 해당하는 부문을 초지의 범위로 검토하고 있다(Lee et al., 2023).

결국, 국내에서 초지에 대한 법적 정의와 공간정보의 구분은 다소 상이하다. 국내 초지법과 LX맵의 목장용지는 주로 축산업적 활용에 중점을 두고 정의하는 반면, 토지피복도의 자연초지는 IPCC 가이드라인과 유사하게 폭넓은 범위로 초지를 정의하고 있다. 현재 국내 온실가스 인벤토리에서 초지는 지목상 ‘목장용지’로 한정되어 있지만, IPCC 가이드라인에 따른 초지의 범위는 목장용지뿐만 아니라 산림지 수준 이하의 식생이 분포하며, 산림으로 성장하기 어려운 초지까지 포함한다. 현재 우리나라는 MRV 지침 상 전국의 토지를 모두 관리된 토지(managed area)로 간주하고 있지만(GIR, 2021), 초지 중 목장용지에 해당하지 않는 자연초지에 해당하는 영역에 대해서는 별도의 산정기관 및 관장기관이 부재한 상황이다. 따라서 국내 초지 범위를 확장하여 다양한 유형의 초지를 온실가스 인벤토리에 포함할 필요가 있다. 특히, 초지 내 총 품부도가 다양할수록 탄소 저장량이 증가하는 경향이 있다는 연구가 있으며(Hungate et al., 2017), 자연초지의 경우 비교적 다양한 식물종이 분포하고 있으므로 탄소 흡수 및 저장에 중요한 기능을 할 수 있을 것으로 기대된다.

따라서, 본 연구는 온실가스 인벤토리에서 초지의 범위를 체계적으로 설정하기 위해 현재 사용되고 있는 초지 정의와 범위를 검토하고, 이를 국제 기준(IPCC 정의)과 비교하여 차이점을 분석하는 것을 목표로 한다. 전국에 분포하고 있는 초지의 지역 특성을 분석하여 각 지역의 생태적, 환경적 특성을 이해하고자 한다. 또한, 타 공간정보와의 정합성을 위해 타 산정기관 자료와의 비교를 수행하였다. 마지막으로, 자연초지의 공간적 특성을 분석하여 정책 수립 및 관리 방안에 대한 구체적 제언을 도출하고자 한다.

2. 연구 방법

본 연구는 두 단계로 구성된다. 첫째, 초지의 면적 분석을 실시하였다. 현재 산정기관인 국립축산과학원에서 제시하고 있는 초지의 범위인 지적상 “목장용지”에 해당하는 LX맵 상 초지의 면적을 도출하였다. 또한, 보다 확장된 초지의 정의 및 범위를 검토하기 위해 환경부 제작 중

분류 토지피복지도 상에서의 초지 면적을 도출하여, 해당 면적을 비교하였다. 또한 두 지역을 상호 중첩하여 두 공간정보에서 제시하고 있는 초지의 면적 차이를 비교하고, 차이가 발생하는 지역에 대한 분석을 실시하였다. LX맵 상 목장용지 지역의 토지피복을 분석하였으며, 중분류 토지피복지도 상 자연초지에 해당하는 지역의 LX맵 상 지목을 분석하였다(Fig. 1).

둘째, 토지피복지도 상 자연초지에 해당하는 지역과 LULUCF 분야의 다른 토지이용에 해당하는 타 산정기관의 자료와의 중첩 분석을 실시하였다(Table 1, Fig. 2). 산림지에 해당하는 임상도, 농경지에 해당하는 팜맵, 습지에 해당하는 습지기초지도, 정주지에 해당하는 LX맵과의 중첩을 실시하였다. 구체적으로 산림지는 임상도의 침엽수

림, 활엽수림, 혼효림, 죽림, 무림목지가 포함되며, 농식품 팜맵 서비스의 논, 밭, 과수원, 시설재배지를 포함하였다. 습지의 경우 습지기초지도의 습지 경계선을 활용하였으며, 정주지는 LX맵 상 해당 필지의 지목이 광천지, 염전, 대, 공장용지, 학교용지, 주차장, 주유소용지, 창고용지, 도로, 철도용지, 제방, 수도용지, 공원, 체육용지, 유원지, 종교용지, 사적지, 묘지인 지역에 대해 중첩 분석을 실시하였다. 해당 중첩 분석은 타 생태계 유형에서 산정되지 않는 누락된 지역을 도출하고, 그 지역 중 자연초지에 해당하는 지역을 도출하고, 해당 지역을 온실가스 인벤토리 산정에 활용하기 위함이다. 중첩 분석에 활용하는 자료의 경우 각 기관에서 생산하는 가장 최신 자료를 활용하여 진행하였으며, 이를 통해 제작 시점에 따른 오차를 최소화하도록 하였다.

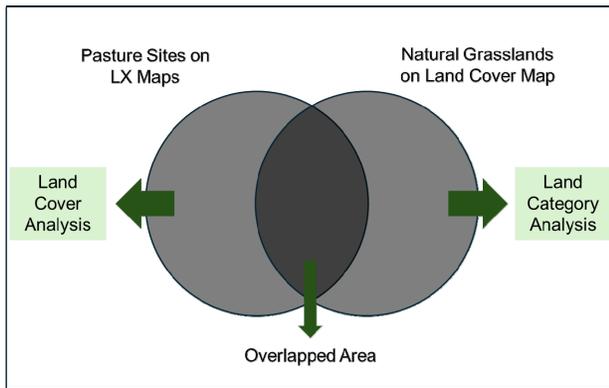


Fig. 1. Overlap analysis between pasture sites on LX maps and natural grasslands on land cover map

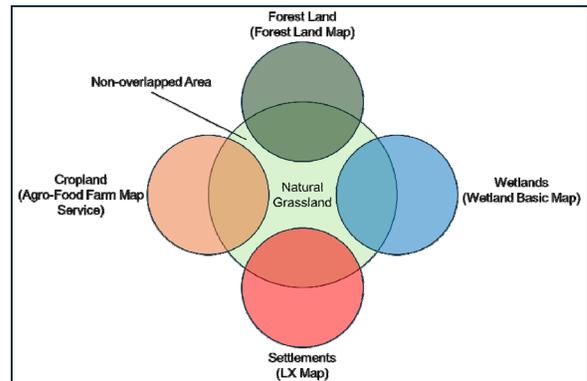


Fig. 2. Overlap analysis of natural grassland with spatial data from other categories

Table 1. Other LULUCF land use categories and corresponding overlap analysis data

Ecosystem type	Map source	Responsible institution	Attributes
Forest land	Forest map (2024)	Korea forest service	Coniferous forest, broadleaf forest, mixed forest, bamboo forest, unstocked forest land
Cropland	Agro-food farm map service (2023)	Korea agency of education, promotion and information service in food, agriculture, forestry and fisheries	Rice paddy, field, orchard, facility cultivation site
Wetlands	Wetland basic map (2022)	National institute of ecology	Inland Wetlands
Settlements	LX map (2024)	Korea land and geospatial InformatiX corporation (LX)	Mineral spring site, saltern, site, factory site, school site, parking lot, gas station site, warehouse site, road, railway site, bank, water supply site, park, gymnastic site, recreation area, religion site, historic site, graveyard, miscellaneous land

3. 연구 결과

3.1. 면적 분석

전국에 분포하고 있는 초지의 면적을 비교 분석하였다 (Table 2). 먼저, 현행 LX맵 상 목장용지의 면적은 542.74 km²로 나타났다. 반면, 중분류 토지피복지도 상의 초지 면적은 7,974.29 km²로 나타났으며, 자연초지의 경우 205.64 km², 인공초지는 7,768.65 km²로 나타났다. 즉, LX맵에서 정의하고 있는 초지의 범위보다, 토지피복 상 초지의 범위가 넓은 것을 확인할 수 있으며, 토지피복 상 초지 중 대부분이 골프장, 묘지와 같은 인공초지가 대부분을 차지하는 것을 확인할 수 있다.

현행 목장용지 542.74 km²를 분석하면, 현행 목장용지와 중첩되는 지역 중 토지피복 상 자연초지와 중첩되는 지역은 목장용지 면적의 0.46%인 2.48 km²에 불과했으며, 인공초지와 중첩하는 지역도 23.87%에 해당하는 129.53 km²에 불과했다. 반대로, 토지피복지도 상 자연초지 205.64 km²에 대해서는 지적 상 목장용지에 해당하는 면적이 전체의 1.21%에 해당하는 2.48 km²에 불과했으며, 인공초지 7,768.65 km² 중 지적 상 목장용지는 129.53 km²에 해당하는 것으로 나타났다(Table 3).

LX맵 상 목장용지 542.74 km²에 대한 토지피복에 대한 분석을 실시하였다(Table 4). 중분류 토지피복지도와 중첩

Table 2. Area comparison between LX map pasture site and land cover map grassland areas

Category	Area (km ²)	Description
LX map pasture site	542.74 km ²	Total pasture area based on the LX map
Grassland in land cover map	7,974.29 km ²	Total grassland area in the land cover map
- Natural grassland	7,768.65 km ²	Natural grassland in the land cover map
- Artificial grassland	205.64 km ²	Artificial grassland in the land cover map

Table 3. Overlay analysis of LX map pasture site and land cover map grasslands

Category		Area (km ²)	Description
Overlap	Overlap with natural grassland	2.48 km ²	LX pasture site overlapping with natural grassland
	Overlap with artificial grassland	129.53 km ²	LX pasture site overlapping with natural grassland
Non-overlap	Non-overlap (LX pasture site)	410.73 km ²	LX pasture site not overlapping with any grassland
	Non-overlap (natural grassland)	203.16 km ²	Natural grassland not overlapping with LX pasture site

시, 토지피복 상 초지에 해당하는 132.01 km²를 제외하고, 농업지역과 중첩되는 지역 229.00 km² (42.19%)로 가장 큰 면적을 차지하였으며, 산림지역과 중첩되는 지역이 150.08 km² (27.65%)에 해당한다. 그 외 시가화건조지역과의 중첩지는 15.09 km², 나지 12.90 km² 습지 2.03 km², 수역 1.63 km²로 나타났다. 중분류 기준으로는 농업지역의 발에 해당하는 지역이 108.74 km²로 가장 크게 나타났으며, 산림지의 활엽수림이 85.98 km², 농업지역의 기타재배지가 83.60 km², 산림지의 침엽수림이 44.56 km², 농경지의 논 지역이 23.44 km²로 그 다음 순서로 나타났다. LX맵 상 목장용지가 토지피복 상 농경지와 중첩되는 것

Table 4. Areas overlapping pasture land and land cover map by Land cover

Land cover	Area
Agricultural land	229.00 km ²
Forested land	150.08 km ²
Grassland	132.01 km ²
Urban areas	15.09 km ²
Bareland	12.90 km ²
Wetland	2.03 km ²
Water	1.63 km ²
Total	542.74 km ²

Table 5. Areas overlapping natural grasslands and LX map by Land category

Land Category	Area
Forestry	109.91 km ²
Dry paddy-field	32.58 km ²
Paddy-field	12.74 km ²
River	11.95 km ²
Road	10.71 km ²
Ditch	5.75 km ²
Micellaneous land	3.97 km ²
Building site	3.96 km ²
Marsh	3.80 km ²
Pasture site	2.47 km ²
Etc.	7.78 km ²
Total	205.64 km ²

은 목장용지와 농업지역의 경계가 명확히 구분되지 않거나, 축산 활동과 경작이 혼합된 형태로 이루어지고 있을 가능성을 시사하며, 산림지와 중첩되는 지역의 경우 목장용지 내 일부가 실제로 임목이 자연적으로 성장하였을 것으로 추정된다. 또한, 시가화건조지역과 중첩된 경우 목장용지 내 시설물 등의 면적이 포함된 것으로 해석할 수 있다. 이는 현재 LX맵 상 목장용지가 토지피복 상 초지 외에도 농경지를 비롯한 다른 유형의 토지로 피복되고 있는 것을 확인할 수 있다.

토지피복 상 자연초지 205.64 km²에 대한 대한 지목 분석을 실시하였다(Table 5). 역시 지목 상 목장용지 지역인 2.47 km²를 제외한 나머지 지역을 분석했을 때, 109.91 km² (52.28%)가 지목 상 임야로 나타났다. 32.58 km²가 전, 12.74 km²가 답인 지역으로 나타났으며, 하천(11.95 km², 5.68%), 도로(10.71 km², 5.09%), 구거(5.75 km², 2.74%), 잡종지(3.97 km², 1.89%), 대(3.96 km², 1.88%), 유지(3.80 km², 1.81%) 순으로 나타났다. 그 외 나머지 과수원, 묘지, 제방, 공장용지, 철도용지, 체육용지, 공원, 학교용지, 창고용지, 종교용지, 수도용지, 유원지, 주차장, 주유소용지, 양어장, 사적지, 광천지의 경우 1% 이하의 비율을 나타냈다. 이는 현재 토지피복 상 자연초지인 지역의 경우 지목, 즉 토지의 용도가, 목장용지로 활용되기보다는 임야의 형태로 남아 있거나 전, 답 등 농경 용도 혹은 여러 인간 정주와 관련된 형태로 사용되고 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 근본적으로 토지 관리 및 행정적 분류 방식이 실질적 토지 이용 상태를 완전히 반영하지 못하는 것에 기인한다. 즉, 토지피복지도 상 자연초지의 경우 자연적으로 발생한 초지로 임목이 10% 미만인 경우를 의미하지만, 실제 지목이나 용도에는 차이가 있다는 것을 뜻한다.

종합하자면, 현재 온실가스 인벤토리 상에서 초지 지역에 해당하는 목장용지 지역이 토지피복 상 초지 지역에 비해 낮은 면적을 차지하고 있으며, 두 지역을 중첩 분석하였을 때는 지적과 피복 사이에 현저한 차이가 있는 것으로 나타났다.

3.2. 타 산정기관 자료와의 비교

자연초지 총 면적 205.64 km² 중 LX맵 상 목장용지에 중첩되는 지역을 제외한 203.16 km²의 자연초지 면적에 대해 타 산정기관의 자료와 중첩 지역을 분석하였다(Table 6). 단, 여기서 각 생태계 유형별로 제공된 공간자

Table 6. Overlap analysis of natural grassland with spatial data from other categories

Overlapping category	Overlapping map	Areas
Forest land overlap	Forest land map	97.05 km ²
Cropland overlap	Agro-food farm map service	13.01 km ²
Wetland overlap	Wetland basic map	2.91 km ²
Settlements overlap	LX map	20.58 km ²
Non-overlapping area		71.44 km ²

료 간에도 중첩이 발생할 수 있으므로 중첩된 면적의 총합은 100%를 초과할 수 있다.

자연초지의 203.16 km² 중 임상도의 산림지와 중첩 지역 97.05 km²로 가장 많은 중첩 지역으로 나타났다. 이는 환경부의 토지피복지도와 산림청의 임상도의 정의 차이에서 기인한 결과로 해석될 수 있다. 환경부 토지피복지도에서는 무림목지(미림목지, 관목림, 제지)를 포함하지 않으며, 목재 수확으로 인해 임목이 일시적으로 제거된 지역을 초지로 분류한다. 반면, 산림청의 임상도는 동일한 지역을 산림지로 분류한다. 이러한 정의 차이는 목재수확으로 인해 일시적으로 임목이 제거된 토지가 두 공간정보 상에서 서로 다르게 분류되는 원인을 제공한다. 국제적으로도 FAO에서는 목재수확으로 임목이 일시적으로 제거된 지역을 산림으로 간주한다. 따라서 해당 지역은 산림지의 인벤토리 산정과 중복될 가능성이 있는 지역이다. 그 외 농식품 팜맵 서비스의 농경지에 해당하는 지역과의 중첩 지역이 13.01 km²였으며, 내륙습지는 2.91 km², 정주지와 중첩 지역은 20.58 km²로 나타났다. 해당 중첩 면적들은 자연초지가 별개로 산정되지 않더라도 해당 생태계 유형 별 산정기관에서 온실가스 인벤토리의 활동 면적으로 활용할 수 있는 지역임을 의미한다. 이는 자연초지가 단일 생태계로 분류되지 않더라도 다른 유형의 생태계에 속한 영역에서 온실가스 배출 및 흡수 활동을 추적할 수 있는 잠재적 데이터로 활용 가능하다.

반면, 각 산정기관별 자료와 중첩되지 않는 지역의 경우, 어느 기관의 자료에도 포함되지 않는 지역으로, 기존의 생태계 유형으로 분류되지 않는 지역을 의미한다. 이러한 지역은 온실가스 인벤토리 산정 시 누락될 가능성이 있는 지역이며, 해당 면적은 71.44 km²로 나타났다. 이는 기존 산정기관 자료와의 중복 또는 충돌 없이 추가적으로 온실가스 배출 및 흡수량 산정이 가능한 잠재적 면적으로 볼 수 있다. 따라서, 이러한 면적을 포함함으로써 온실가

스 인벤토리의 완전성을 강화할 수 있을 것으로 기대된다. 다만, 초지 관련 온실가스 인벤토리의 정확성과 신뢰성을 높이기 위해 향후 해당 지역의 공간적 범위를 명확히 규정하기 위해 면밀한 논의가 추가적으로 필요할 것으로 보인다.

4. 고찰

본 연구는 초지 면적의 분석과 타 산정기관의 생태계 유형별 자료와의 중첩 분석을 통해 초지 부분의 온실가스 인벤토리 구축을 위한 방안을 제시했다는 점에서 중요한 의미를 가진다. 본 연구들을 통해 도출한 시사점은 다음과 같다.

첫째, LX맵과 토지피복지도 상 초지의 정의와 범위 설정에 재검토가 필요함을 시사한다. LX맵 상에서 도출된 목장용지는 토지피복 상 초지에 비해 면적이 작은 것으로 나타났으며, LX맵 기준에 따른 면적만을 초지의 범위로 산정 시 초지에서 온실가스 흡수량이 상대적으로 과소 평가될 수 있다. 또한, TACCC 원칙에 따라 현재 우리나라의 탄소흡수량을 산정할 경우 자연초지 부분이 누락되어 있어 완전성 측면에서 부족함이 있다. 따라서, 토지피복지도 상 초지를 활용하여 초지의 범위를 확장한다면 보다 정확한 온실가스 흡수량을 산정할 수 있을 것으로 기대된다. 아울러, 온실가스 통계의 완전성을 확보하기 위해 초지 내의 목장용지 부대시설 및 도로 부분을 정주지에 포함 시킬 것인지, 혹은 무림목지 지역을 산림이나 초지 중 어떤 지역에 포함시킬 것인지와 같은 전반적인 초지의 정의와 범위에 대한 재검토가 필요할 것이다.

둘째, 자연초지가 탄소 흡수원으로의 기능을 가질 가능성이 있음에도 불구하고, 현행 온실가스 인벤토리 체계에서는 충분히 고려되지 않고 있다는 점이다. 원칙적으로 자연초지는 인위적 간섭이 없는 경우 온실가스 통계의 보고 대상에서 제외된다(파리협정 제4조, 제13조). 이에 따라 현재 초지 부분의 산정기관인 국립축산과학원은 목장용지 외 자연초지를 산정하지 않으며, 타 산정기관에서도 해당 지역을 산정하지 않고 있다. 일부 자연초지는 산림, 농경지, 습지 등 타 생태계 유형과 중첩되어 온실가스 인벤토리에 반영될 가능성이 있지만, 중첩되지 않는 지역은 온실가스 산정에 포함되지 못하고 있는 실정이다. 따라서 이러한 지역에 대한 추가적인 산정과 자연초지 관련 보호 지역 설정이나 모니터링과 같은 국가 차원에서의 관리가

이루어진다면, 초지 부분의 온실가스 인벤토리 산정의 완전성과 정밀성을 높이는 데 기여할 것이다.

다만, 자연초지가 탄소 흡수원으로 인정 받기 위해서는 온실가스 인벤토리의 보고 체계를 갖추는 것이 선행되어야 한다. 현재 국가 온실가스 인벤토리의 초지 부문에서는 목장용지의 토양탄소에 대하여만 산정하고 있다(GIR, 2023). 그러나, 자연초지의 경우 탄소흡수원으로 고려되고 있지 않기 때문에 인벤토리 보고에서 제외되고 있으며, 산정 및 개발 계획도 전무한 실정이다. 또한, 자연초지에 대한 별도의 관장기관이나 산정기관이 부재한 상황이다. 따라서, 자연초지 바이오매스 산정과 고도화를 위해서는 초지 바이오매스에 대한 국제적 동향 파악과 국내 자연초지 상황에 적용가능한 방법론 개발 등의 지속적인 연구가 필요하며, 자연초지를 대상으로 국가고유 계수 개발의 노력이 뒷받침되어야 할 것이다.

본 연구의 결과는 초지 정의의 확대와 자연초지의 온실가스 통계 반영 필요성을 강조하며, 초지 생태계의 온실가스 흡수 및 저장 기능을 강화할 수 있는 관리 방안을 제시했다는 점에서 의의를 가진다. 향후 연구에서는 해외 사례를 바탕으로 자연초지의 탄소 흡수량을 평가하고, 더 나아가 국가 고유 계수를 개발하는 데 집중해야 할 것이다. 이를 통해 우리나라 초지의 온실가스 인벤토리 체계를 국제 기준에 부합하도록 개선하고, 온실가스 감축 목표 달성에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결론

본 연구는 국내 초지 분야의 온실가스 인벤토리 구축에 있어 초지의 정의와 범위 설정의 문제를 분석하고, 자연초지의 탄소흡수원으로서의 중요성을 강조하였다. 연구 결과, LX맵 상의 목장용지는 토지피복지도 상 초지 면적에 비해 현저히 작은 것으로 나타났으며, 자연초지가 온실가스 인벤토리에서 충분히 반영되지 못하고 있다는 한계를 확인하였다. 이를 해결하기 위해서는 자연초지에 적합한 독자적인 계수와 방법론 개발이 필요하며, 이를 통해 탄소 흡수량 산정의 정밀성과 완전성을 향상시킬 수 있을 것이다.

특히 향후 연구에서는 다음과 같은 방향으로 진행될 필요가 있다. 첫째, 자연초지의 탄소 흡수량을 실측 데이터 기반으로 정량적으로 산정하고, 국내 상황에 맞는 국가 고유 계수를 개발해야 한다. 본 연구에서는 단순히 초지의 정의에 따른 면적 증가만을 다룰 뿐 실질적인 탄소흡

수량을 제시하지는 못했다. 이는 현재의 국내 온실가스 산정 체계가 통계 면적 기반의 Approach 1 기반으로 구축되어 있으며, 기존의 목장용지에 해당하는 부분 또한 IPCC의 고유 계수만을 사용하는 Tier 1 수준에 머물러 있기 때문이다. 따라서 국내 환경에 맞는 계수 개발이 동반되어야 만이 실질적으로 온실가스 인벤토리 상 초지 범위 확대에 의한 온실가스 흡수량의 확대, 더 나아가 국내 온실가스 배출흡수량에 미치는 영향을 확인할 수 있을 것이다. 둘째, 자연초지의 탄소 흡수 및 저장 기능을 온실가스 감축 목표에 반영하기 위해 공간적 모니터링 체계와 정밀한 관리 전략을 수립해야 한다. 현재 인위적 간섭이 없다는 이유로 일부 토지가 온실가스 통계에서 제외되는 경우가 있지만, 산림지의 경우 보호지역으로 설정된 천연림이 온실가스 산정 대상에 포함된 사례가 있다. 이와 유사하게 국가 차원의 모니터링 체계를 통해 자연초지의 상태를 평가하고 보호 및 관리 전략을 마련함으로써, 자연초지 역시 온실가스 산정에 포함될 수 있는 방안을 검토해야 한다. 이를 통해 자연초지가 온실가스 흡수원으로서의 역할을 강화하고, 국가적 감축 목표 달성에 기여할 수 있을 것이다.

본 연구는 초지의 탄소흡수원으로서의 역할을 고려한 온실가스 인벤토리 구축의 중요성을 강조하며, 향후 초지 관리와 온실가스 인벤토리의 산정 방법과 관련 정책 수립에 있어 보다 정교한 접근이 필요함을 시사한다. 이는 국내 초지의 온실가스 산정 방법론의 개선과 함께 기후변화 온실가스 흡수량 증대를 통한 온실가스 목표 달성, 더 나아가 기후변화 완화에 기여할 수 있는 중요한 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

사사

본 연구는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 지원을 받아 생태계 기반 탄소흡수원 조성관리 기술개발사업(과제번호 RS-2023-00218243)을 통해 수행되었습니다.

Reference

- Bai Y, Cotrufo MF. 2022. Grassland soil carbon sequestration: Current understanding, challenges, and solutions. *Science* 377(6606): 603-608.
- Bornmann L, Haunschild R, Boyack K, Marx W, Minx JC. 2022. How relevant is climate change research for climate change policy? An empirical analysis based on Overton data. *PLoS ONE* 17(9): e0274693. doi: 10.1371/journal.pone.0274693
- Chang J, Ciais P, Viovy N, Vuichard N, Sultan B, Soussana J-F. 2015. The greenhouse gas balance of European grasslands. *Glob Change Biol* 21(10): 3748-3761.
- Choi WJ, Han SH, Ahn SJ. 2022. Current status and implications of the LULUCF calculation system for the construction of greenhouse gas inventory. Seoul, Korea: Green Technology Center. GTC BRIEF Vol. 3 No. 18.
- DCCEEW (Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water). 2022. National inventory report 2022.
- Deng L, Yuan H, Xie J, Ge L, Chen Y. 2022. Herbaceous plants are better than woody plants for carbon sequestration. *Resour Conserv Recycl* 184: 106431. doi: 10.1016/j.resconrec.2022.106431
- EPA (United States Environmental Protection Agency). 2022. Inventory of U.S. greenhouse gas emissions and sinks: 1990-2021.
- Ghosh P, Mahanta SK. 2014. Carbon sequestration in grassland systems. *Range Manag Agrofor* 35: 173-181.
- GIR (Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea). 2021. National greenhouse gas statistics calculation, reporting, and verification guidelines -11th revision-.
- GIR (Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea). 2023. 2023 National inventory report.
- Hsieh YL, Yeh SC. 2024. The trends of major issues connecting climate change and the sustainable development goals. *Discov Sustain* 5: 31. doi: 10.1007/s43621-024-00183-9
- Hungate BA, Barbier EB, Ando AW, Marks SP, Reich PB, van Gestel N, Tilman D. 2017. The economic value of grassland species for carbon storage. *Sci Adv* 3: e1601880.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2003. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry (GPG-LULUCF). Hayama, Japan:

- Institute for Global Environmental Strategies.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2006. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Hayama, Japan: Institute for Global Environmental Strategies.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2023. Sections. In: Core Writing Team, Lee H, Romero J (eds). Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of Working groups I, II, and III to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland: IPCC. p. 35-115. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647
- Jang IY, Jeong HM, Han SH, Ahn NH, Kim DY, Kang SR. 2023. Estimation of carbon storages and fluxes by ecosystem type in Korea (in Korean with English abstract). *J Wetl Res* 25(4): 417-425.
- Kang SM, Cha JW, Yu JM, Lee SJ. 2024. Application of key category analysis in regional greenhouse gas inventory in Seoul (in Korean with English abstract). *J Clim Change Res* 15(3): 401-413.
- Lal R. 2010. Managing soils and ecosystems for mitigating anthropogenic carbon emissions and advancing global food security. *BioScience* 60(9): 708-721.
- Lee SG, Lee JK, Kim HJ. 2023. Verification of international trends and applicability in the Republic of Korea for a greenhouse gas inventory in the grassland biomass sector (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Grassl Sci* 43(4): 257-267.
- Li J, Huang L, Cao W, Wang J, Fan J, Xu X, Tian H. 2023. Benefits, potential and risks of China's grassland ecosystem conservation and restoration. *Sci Total Environ* 905: 167413.
- Lorenz K, Lal R. 2018. Soil carbon stock. In: Lal R (ed). Carbon sequestration in agricultural ecosystems. Cham, Switzerland: Springer. p. 39-136.
- MfE (Ministry for the Environment). 2022. New Zealand's greenhouse gas inventory 1990-2021.
- NIES (National Institute for Environmental Studies, Japan). 2022. National greenhouse gas inventory report of Japan 2022.
- Olivier JGJ, Van Aardenne JA, Dentener FJ, Pagliari V, Ganzeveld LN, Peters JAHW. 2005. Recent trends in global greenhouse gas emissions: Regional trends 1970-2000 and spatial distribution of key sources in 2000. *Environ Sci* 2(2-3): 81-99. doi: 10.1080/15693430500400345
- Oreskes N. 2004. The scientific consensus on climate change. *Science* 306(5702): 1686. doi: 10.1126/science.1103618
- Smit B, Wandel J. 2006. Adaptation, adaptive capacity and vulnerability. *Glob Environ Change* 16(3): 282-292. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2006.03.008
- Soussana JF, Pilegaard K, Ambus P. 2004. Annual greenhouse gas balance of European grasslands. First results from GreenGrass. Proceedings of the Greenhouse Gas Emissions from Agriculture - Mitigation Options and Strategies; 2004 Sep 4-Sep 12; Freiburg, Germany.
- Statistics Finland. 2022. Greenhouse gas emissions in Finland 1990-2021: National inventory report under the UNFCCC and the Kyoto Protocol.
- UBA (Umweltbundesamt). 2022. National inventory report for the German greenhouse gas inventory 1990-2021.
- Umemiya C, White M, Amellina A, Shimizu N. 2017. National greenhouse gas inventory capacity: An assessment of Asian developing countries. *Environ Sci Policy* 78: 66-73. doi: 10.1016/j.envsci.2017.09.008
- White RP, Murray S, Rohweder M. 2000. Pilot analysis of global ecosystems: Grassland ecosystems. Washington, DC: World Resources Institute.