

북한 산림복원 전략에 따른 탄소저장량 잠재성 평가

조원희, 김인유¹, 고동욱^{2,*}

국민대학교 산학협력단, ¹국민대학교 산림자원학과, ²국민대학교 산림환경시스템학과

Assessment of potential carbon storage in North Korea based on forest restoration strategies

Wonhee Cho, Inyoo Kim¹ and Dongwook Ko^{2,*}

Industry-Academic Cooperation Foundation, Kookmin University, Seoul 02707, Republic of Korea

¹Department of Forest Resources, Kookmin University, Seoul 02707, Republic of Korea

²Department of Forest, Environment, and Systems, Kookmin University, Seoul 02707, Republic of Korea

Contribution to Environmental Biology

- Scenarios developed in the study can the forest restoration efforts in North Korea 2000 to 2020.
- This study contributes to and evaluation the effects of forest restoration strategies on carbon storage in North Korea.

*Corresponding author

Dongwook Ko

Tel. 02-910-5826

E-mail. dwko@kookmin.ac.kr

Received: 26 April 2023

First revised: 27 July 2023

Second revised: 31 July 2023

Revision accepted: 24 August 2023

Abstract: This study aimed to conduct a comprehensive assessment of the potential impact of deforestation and forest restoration on carbon storage in North Korea until 2050, employing rigorous analyses of trends of land use change in the past periods and projecting future land use change scenarios. We utilized the CA-Markov model, which can reflect spatial trends in land use changes, and verified the impact of forest restoration strategies on carbon storage by creating land use change scenarios (reforestation and non-reforestation). We employed two distinct periods of land use maps (2000 to 2010 and 2010 to 2020). To verify the overall terrestrial carbon storage in North Korea, our evaluation included estimations of carbon storage for various elements such as above-ground, below-ground, soil, and debris (including litters) for settlement, forest, cultivated, grass, and bare areas. Our results demonstrated that effective forest restoration strategies in North Korea have the potential to increase carbon storage by 4.4% by the year 2050, relative to the carbon storage observed in 2020. In contrast, if deforestation continues without forest restoration efforts, we predict a concerning decrease in carbon storage by 11.5% by the year 2050, compared to the levels in 2020. Our findings underscore the significance of prioritizing and continuing forest restoration efforts to effectively increase carbon storage in North Korea. Furthermore, the implications presented in this study are expected to be used in the formulation and implementation of long-term forest restoration strategies in North Korea, while fostering international cooperation towards this common environmental goal.

Keywords: North Korea, LULC scenarios, carbon storage, reforestation, forest restoration strategy

1. 서 론

국제사회는 1988년 기후변화에 관한 정부 간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 설립과 1992년 유엔기후변화협약(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) 체결을 시작으로 매년 유엔기후변화협약 당사국 총회(Conference of Parties, COP)를 개최하며 기후변화 적응 방안 마련을 위한 공조를 지속하고 있다. 특히, 2015년 파리협정(Paris agreement)에서는 참여국의 온실가스 감축 목표에 대한 이행을 약속하였고, 우리나라(이하 남한)는 2030년까지 2018년 대비 40% 감축과 2050년 탄소중립 실현을 선언하였다(The Government of the Republic of Korea 2020). 우리나라와 지리적으로 가장 가까운 북한은 파리협정을 통해 산림복원과 탄소중립 기여를 위해 167만 ha 산림조성을 발표하였으며, 이를 위해 연간 종자 2백 톤(ton), 묘목 4억 그루 등을 국제사회에 요청하였다(KFS 2016).

북한의 산림은 관리 부실로 인해 1970년과 1990년 사이 17%, 1990년과 2015년 사이 40%가 감소하였다(Ji 2016). 이를 개선하기 위해 북한은 산림복원에 대한 다양한 노력을 기울이고 있다(Lee 2004; NIFOS 2022). 대표적으로 2010년을 전후로 주민참여를 통한 식량문제 해결과 산림복원을 위한 임농복합경영(Agroforestry) 방식 도입, 2012년 ‘산림건설총계획(2013~2042)’ 수립, 2015년 이후 산림복원 정책인 ‘산림복구전투’를 실시하고 있다(Park 2013; Kim *et al.* 2016). 북한의 내부적인 산림복원 노력 이외에도 우리나라를 중심으로 북한 산림관리에 대한 변화, 남북협력을 위한 ‘그린데탕트(Green Detente)’ 체계 구축, 산림복원을 위한 거버넌스(Governance) 구축, 산림황폐화에 대한 정량적 평가, 북한 환경에 적합한 조림수종 선정, ‘그린데탕트’ 실천전략 모색에 대한 다양한 연구가 수행되고 있다(Park *et al.* 2009; Park and Park 2012; KINU 2014; NIFOS 2014, 2015; Choi *et al.* 2017). 그러나 북한의 산림복원과 탄소중립 기여를 위한 내·외부의 다양한 정책에 대한 효과를 정량적으로 예측하는 것은 매우 어려운 실정이다.

산림의 복원과 탄소중립에 대한 정량적 평가 수행을 위해서는 육상생태계가 지닌 탄소저장량에 대한 예측 평가가 진행될 필요가 있으며, 이를 위해 토지이용 변화에 대

한 예측 결과를 마련함과 동시에 토지이용 유형에 따른 탄소저장량을 추정하는 것은 필수적이다. 남한도 기후변화와 토지이용 및 토지이용 변화에 따른 육상생태계 탄소저장량 추정 연구에 노력을 기울이고 있으며(Chung *et al.* 2015; NIFOS 2015; Kim *et al.* 2016a; Kim *et al.* 2016b), 일부 지역에 대해서는 기후변화, 산림자원의 이용, 토지이용 변화 등을 시나리오로 구축하여 탄소저장량의 미래 전망 연구가 시도되고 있다(Cho 2022).

토지이용 변화 예측은 과거의 토지이용 정보들을 바탕으로 추정한 토지이용 변화 경향성에 기반하여 수행되고 있으며, 최근에는 이를 시공간적으로 모의(simulation)하기 위해 로지스틱 회귀분석, 다층퍼셉트론, 머신러닝 등을 활용해 추정한 토지이용 유형 간의 변화 경향성을 바탕으로, 복잡계 변화 예측에 활용되는 셀룰러 오토마타 마르코프 모델(Cellular Automata Markov model, CA-Markov)과 결합하여 중·장기적인 토지이용 변화 예측을 시도하고 있다(Arsanjani *et al.* 2013; Bhang *et al.* 2018; Li *et al.* 2020). 따라서, 북한지역의 산림관리 부실과 회복노력 등에 따른 장기적인 탄소저장량 변화를 평가함에 있어 토지이용 변화 예측 모델링은 토지이용 변화 시나리오 구축과 이에 기반한 탄소저장량 추정을 위한 기반을 마련하는 데 효과적일 것으로 판단된다.

이에 본 연구에서는 북한의 과거 20년(2000~2020)간의 토지이용 공간정보를 바탕으로 2010년 이전과 이후의 토지이용 변화 경향성 분석 및 토지이용 변화를 예측하고 시나리오로 구축하였다. 구축된 시나리오에 문헌조사를 통해 추정한 토지이용 유형별 탄소저장량 계수를 적용하여 북한의 토지이용 변화 경향에 따른 탄소저장량에 대한 정량적 예측 평가를 시도하였다. 이를 통해 북한의 산림복원을 위한 내·외부적 노력에 대한 효과를 평가함과 동시에 향후 북한 산림복원과 연관된 정책을 추진하는 데 기여할 것으로 기대된다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구대상지

북한은 동북아시아 37°41'00"N~43°00'36"N, 124°18'41"E~130°41'32"E 사이에 위치하며 한반도의 북쪽 지역에 해당한다(Fig. 1). 북한의 전체 면적은 120,540km²로

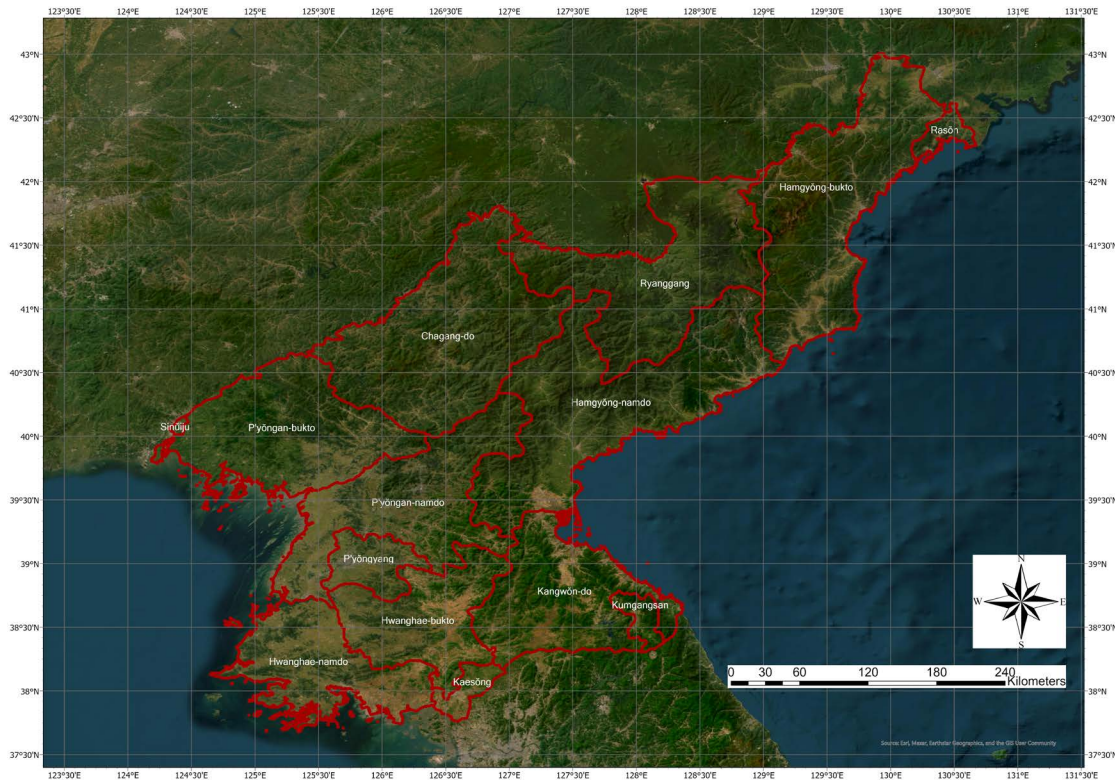


Fig. 1. The location of North Korea (Study area).

알려져 있으며 80% 지역이 산림으로 구성되어 있다. 북한의 행정구역은 총 9개로 나뉘고 수도인 평양시를 기점으로 남서부의 개성시, 북서부의 신의주시, 북동부의 청진시 등의 주요 도시가 분포하고 있다. 북한의 평균 고도는 440 m이고 2,000 m 이상의 고원지대도 포함하고 있으며, 동쪽의 고지대와 서쪽의 저지대로 구성되어 있다. 기후 특성은 온대림 기후로 사계절이 뚜렷한 것으로 알려져 있다.

2.2. 북한 토지이용 변화 시나리오 구축

북한의 토지이용 변화 시나리오 구축에는 두 시점의 토지이용 공간정보를 바탕으로 추정된 토지이용 전이행렬과 셀룰러 오토마타 마르코프 모델(CA-Markov)을 통해 추정된 토지이용 잠재전이확률 분포를 활용하였다(Fig. 2). CA-Markov는 셀룰러 오토마타(Cellular Automata, CA)의 개념과 마르코프체인(Markov Chain)의 개념을 합친 모델이며, CA는 한정된 격자형 공간에서 격자 사이의 변화가 특정 규칙에 따라서 발생하는 개념을 지닌다(Wolfram 1983). 마르코프체인은 ‘특정 상태의 확률은 오

직 과거의 상태에 의존한다’라는 개념으로 정의할 수 있고, 특정 상태의 무작위적 변화 과정에서 미래의 상태는 오직 현재에만 의존하는 특징을 지닌다(Gagnieu 2017). 마르코프체인은 현재 상태와 유형별 전이행렬에 따라서 나타낼 수 있다. 즉, CA-Markov 개념을 통한 북한의 토지이용 변화 시나리오 구축은 단일 토지이용 공간정보 속 특정 격자의 타 토지전용(토지이용 변화) 예측에 기반한다. 이는 토지이용 사이의 전이행렬을 구축하여 시계열별 정량적 토지이용 변화를 추정하고 격자형 공간으로 구성된 잠재전이확률을 고려하였으며, 2020년부터 2050년까지의 미래 토지이용에 대한 예측과 시나리오 구축을 시도하였다.

2.2.1. 토지이용 변화 예측 모델

본 연구에서는 토지이용 변화 예측에 유용한 TerrSet Land change modeler (LCM)를 사용하였다. 이는 TerrSet 2020 소프트웨어에 내재되어 있으며, Clark lab (Clark University)에서 개발되었다. TerrSet 2020은 IDRISI (integrated geographic information system with remote

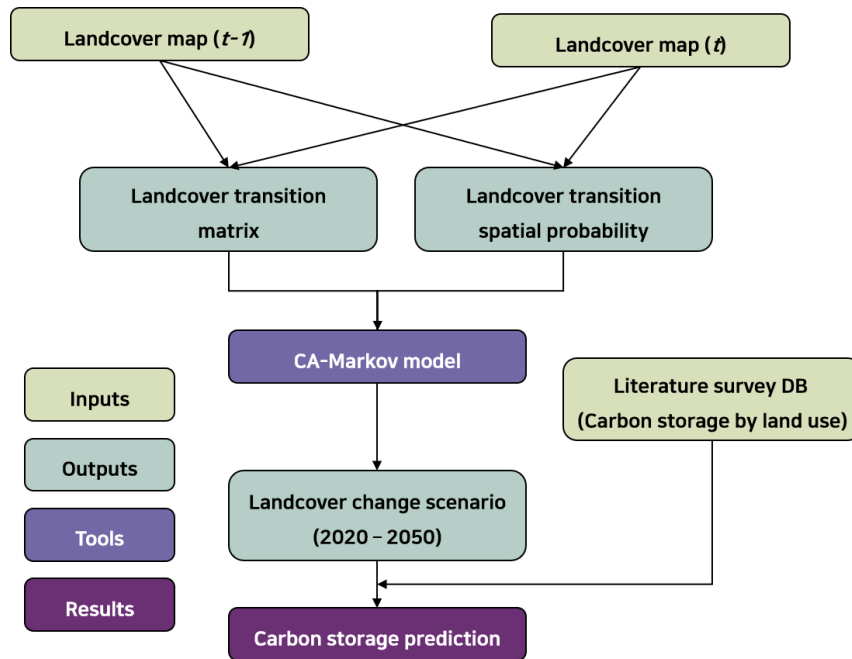


Fig. 2. Conceptual diagram of the study.

sensing capabilities for the analysis of geospatial data)로 정의된 지형분석 체계를 기반으로 육상생태계의 지형정보 분석(토지이용 변화, 서식지 및 생물다양성 분석 등)을 수행할 수 있는 종합 모델이다(Bradley *et al.* 2017; Anand and Oinam 2020; Raj and Sharma 2022). LCM은 사용자가 지정한 두 시점의 토지이용 공간정보를 기반으로 잠재전이확률 공간분포 추정과 전이행렬 등을 분석할 수 있으며, 이에 따라 두 시점의 토지이용 공간정보를 바탕으로 미래 토지이용에 대한 공간정보를 제공할 수 있다. LCM을 활용한 토지이용 변화 예측 결과물은 생물다양성 감소, REDD+ 평가 등 토지이용 변화에 따른 생태·환경 문제 평가에 주로 활용되고 있다(Ansari and Golabi 2019; Hasan *et al.* 2020; Mwabumba *et al.* 2022).

2.2.2. 북한의 과거 토지이용 변화

본 연구에서는 북한 산림복원에 대한 내·외부적 노력이 본격적으로 수행된 2010년 전후에 대한 토지이용 변화 경향성을 토대로 미래 토지이용 변화 시나리오로 구축하고자 GlobeLand30에서 제공하는 2000년, 2010년, 2020년의 북한 토지이용 공간정보를 활용하였다(Fig. 3). GlobeLand30은 식생지수의 시계열 변화 및 반사특성, 영상의 질감 등을 고려하여 전 세계 토지이용을 30 m 해상

도 수준에서 10가지 유형으로 분류하였다. Landsat 위성 영상과 HJ-1 영상을 이용하여 개발되었으며, 2000년부터 10년 단위의 자료를 제공하고 있다(Jun *et al.* 2014). GlobeLand30의 정확도는 토지이용 유형에 따라 큰 차이를 보이지만 전체적인 정확도는 2010년 이전 자료기준 83.5% 수준이고 0.78의 Kappa 계수를 지니는 것으로 보고되고 있다.

북한 토지이용 현황은 산림지(Forest)와 농경지·초지·관목지(Cultivated, Grass, Shrub)가 북한 전체 면적의 96%를 차지하는 것으로 나타났다. 반면에, 도심지는 모든 시점에서 전체 면적의 1% 수준으로 나타났지만, 그 면적이 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 3). 이에 따라 북한의 전역의 대부분을 차지하는 토지이용 유형과 토지이용의 변화가 꾸준히 나타나는 유형만을 고려하여 토지이용 전이행렬, 잠재전이확률 등을 추정하였다. 2020년에 발행한 GlobeLand30은 16 m 공간해상도의 GF-1 위성 영상을 추가하여 전체적인 정확도를 2010년 대비 2.2%를 증진시켰다(Chen *et al.* 2015). 이 과정에서 북한의 농경지와 초지, 관목지가 2010년 자료대비 큰 차이가 나타났다. 이는 향후 토지이용 변화 예측 모델을 기반으로 구축하는 북한 토지이용 변화 시나리오에 큰 오류를 유발할 가능성이 있으며, 본 연구에서는 GlobeLand30이 개선됨에 따라

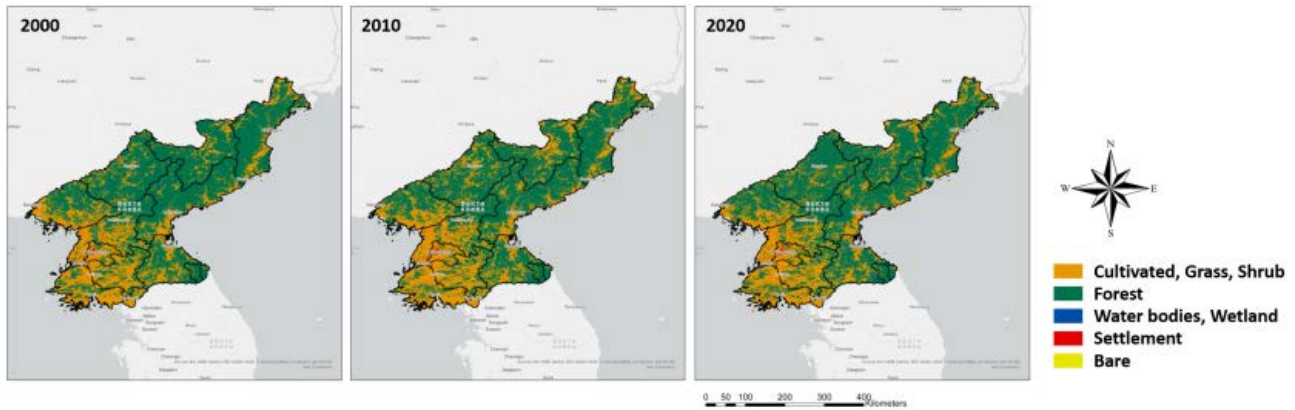


Fig. 3. Time series land use map in North Korea (source: GlobeLand30).

발생한 농경지와 초지, 관목지 사이의 시계열에 따른 격차를 배제하기 위해 하나의 토지이용 유형으로 재분류하여 사용하였다.

북한의 과거 20년간 토지이용 유형의 비율은 산림지가 2000년 64% (78,526 km²), 2010년 60% (73,159 km²), 2020년 63% (76,782 km²)로 가장 큰 것으로 추정되었으며, 농경지·초지·관목지가 34% (41,750 km²), 38% (46,845 km²), 35% (42,693 km²)로 두 번째로 큰 비중을 차지하였다. 산림지는 2000년 대비 2010년에 5,367 km² 감소하였고 농경지·초지·관목지는 5,095 km² 증가하였다. 반면에 산림지는 2010년 대비 2020년에 3,623 km² 증가하였고, 농경지·초지·관목지는 4,152 km² 감소하는 것으로 나타났다.

GlobeLand30의 매 10년 단위 토지이용 공간정보를 통

해 분석한 토지이용 전이행렬은 Tables 1, 2와 같았다. 토지이용 전이는 산림지와 농경지·초지·관목지 사이에서 주로 발생하고 있었고 2000년과 2010년의 토지이용 전이행렬에 따르면 10년 동안 산림지 면적의 9%가 농경지로 변하는 것을 알 수 있었다(Table 1). 또한, 10년 동안 농경지·초지·관목지 면적의 4%가 산림지로 변하는 것으로 나타났다.

2010년과 2020년의 토지이용 전이행렬에 따르면 10년 동안 산림지 면적의 3%가 농경지·초지·관목지로 전이되는 것을 알 수 있으며, 농경지·초지·관목지 면적의 12%가 산림지로 전이되는 것으로 나타났다(Table 2). 이에 2010년과 2020년 사이에는 산림지가 복원되는 것으로 보인다.

토지이용 변화 예측을 위한 입력자료로써 토지이용 유형별 잠재전이확률은 LCM에서 제공하는 랜덤포레스트

Table 1. Land cover transition matrix in North Korea (2000 to 2010)

Land cover 2000 to 2010	Cultivated, Grass, Shrub	Forest	Settlement
Cultivated, Grass, Shrub	96%	4%	0%
Forest	9%	91%	0%
Settlement	11%	1%	88%

Table 2. Land cover transition matrix in North Korea (2010 to 2020)

Land cover 2010 to 2020	Cultivated, Grass, Shrub	Forest	Settlement
Cultivated, Grass, Shrub	87%	12%	1%
Forest	3%	97%	0%
Settlement	11%	1%	88%

(Random Forest, RF) 모델을 활용하여 공간적으로 추정하였다. RF는 머신러닝 알고리즘의 하나로 Ho (1995)에 의해 제안되었으며, 과추정(over estimation)의 오류가 적고, 모델의 단순성과 유연성에 큰 장점이 있는 것으로 알려져 있다. RF를 활용한 분류모델 개발은 전체 표본에서 무작위로 일부를 추출하여 분류하고자 하는 정보에 대한 하위 분류모델을 만들고 선정되지 않은 표본(Out of bag, 이하 OOB)을 통해 이를 평가한다.

본 연구에서는 각 시기별 3가지 토지이용 유형 사이의 잠재전이 확률 추정을 위한 하위 분류모델이 제작되었으며, 각 모델 제작을 위한 표본 선정의 반복 수는 최대 1,000번으로 하였다. 또한, 추정된 잠재전이확률의 신뢰도는 OOB를 통해 평가하였으며, 그 중 OOB 결과가 가장 큰 잠재전이확률의 공간적 분포를 토지이용 예측에 활용하였다. 이에 따라 2000년과 2010년 토지이용 공간정보를 활용한 잠재전이확률은 85.9%의 신뢰도를 지니는 것을 선정하였고, 2010년과 2020년 토지이용 공간정보를 활용한 잠재전이확률은 71.8%의 신뢰도를 지니는 것을 선정하였다. 따라서, 2010년을 전후로 북한의 산림복원에 대한 정책의 차이가 있는 것을 감안하여, 2000년과 2010년 사이의 토지이용 공간정보를 토대로 구축되는 미래 토지이용 변화를 산림황폐화(non-reforestation) 시나리오로 구

축하고, 2010년과 2020년 사이의 공간정보를 토대로 구축되는 미래 토지이용 변화를 산림복원(reforestation) 시나리오로 구축하였다.

2.3. 북한의 탄소저장량 평가방법

북한의 미래 탄소저장량에 대한 평가는 토지이용 변화 시나리오(non-reforestation, reforestation)를 기반으로 국내·외 문헌조사를 통해 추정된 토지이용 유형별 탄소저장량 계수를 적용하여 육상생태계에 한정하여 시도하였다. 토지이용 유형별 탄소저장량계수 추정에 사용된 문헌은 남한을 대상으로 수행된 연구자료를 활용하였으며, 지상부, 지하부, 토양, 낙엽층 및 고사목 4가지를 수집하였다 (Hong *et al.* 2010; Tomasso and Leighton 2014; NIFOS 2015; Kim *et al.* 2016b; Table 3).

탄소저장량 계수는 도심지, 농경지, 초지, 나지, 산림지에 대해 확보하였으며, 도심지와 나지는 추정값을 직접 적용하였고 산림지는 활엽수림, 침엽수림, 혼효림으로 세분화된 계수의 평균을 적용하였다. 농경지와 초지는 문헌조사를 통해 각각 확보하였으나 본 연구에서는 농경지·초지·관목지를 하나의 토지이용 유형으로 분류하였고, 북한의 농경지 비율이 초지의 비율보다 크기 때문에 농경지 탄소

Table 3. Estimated carbon storage in each land use by literature reviews (Unit: tC ha⁻¹)

Land use class	Above ground	Below ground	Soil ¹	Litter and debris	Total	
Settlement ²	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0		
	0	0	0	0		
	0	0	0	0		
Cultivated ²	Paddy	0	69.9	0	57.6	
	Field	0	62.2	0		
	Facility	0	45.9	0		
	Orchard	0	51	13		
	etc.	0	45.9	0		
Forest ^{3,4}	Deciduous	64.07	23.07	55.68	10.13	140.4
	Conifers	57.94	15.64	38.75	13.45	
	Mixed	63.14	20.20	47.22	11.79	
Grass ²	Natural	4.17	16.69	88.2	0	109.06
	Artificial	1.15	4.58	11.5	0	17.23
Bare ²	0	0.33	0.33	0	0.66	

¹Hong *et al.* 2010, ²Tomasso and Leighton 2014, ³NIFOS 2015, ⁴Kim *et al.* 2016a

저장량 계수를 적용하였다. 농경지 계수는 논, 밭, 시설 재배지, 과수원, 기타로 세분화된 계수의 평균을 사용하였다.

북한의 탄소저장량 평가는 2020년 토지이용에 기반한 탄소저장량을 기준선(base-line)으로 하고 non-reforestation과 reforestation 시나리오로 구축되는 토지이용 공간정보에 따라 시계열로 제시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 북한의 토지이용 변화 시나리오

북한의 과거 토지이용 공간정보를 입력자료로 LCM을 통해 구축한 토지이용 변화 시나리오는 Fig. 4와 같다. GlobeLand30의 2000년과 2010년 토지이용 자료를 통해 구축한 결과는 산림지가 농경지·초지·관목지로 크게 전용되는 것으로 나타났다. 이에 따라 2050년까지 산림지가 감소되는 것을 고려하여 산림황폐화(non-reforestation) 시나리오로 정의하였다(Fig. 4A-C). 특히, 평양시를 포함하는 평안남도과 황해북도, 북한 강원도 지역, 함경북도 지역을 중심으로 산림지가 농경지·초지·관목지로 전이되는 것으로 나타났다. GlobeLand30의 2010년과 2020년 토지이용 자료를 통해 구축한 토지이용 변화 예측 결과는 농경지·초지·관목지 토지이용 유형이 주로 산림지로 전용

되는 것을 확인할 수 있었다. 이에 따라 2050년까지 산림지가 증가되는 것을 고려하여 산림복원(reforestation) 시나리오로 정의하였다(Fig. 4D-F). 특히 평안남도과 황해북도를 중심으로 농경지·초지·관목지가 산림지로 전이되는 것으로 나타났다.

종합적으로 본 연구에서 구축한 토지이용 변화 시나리오인 농경지·초지·관목지와 산림지 사이의 전이가 주로 일어나는 것으로 나타났다. 이를 정량적으로 살펴보면 각 시나리오에 따라 농경지·초지·관목지와 산림지의 변화가 상이한 것으로 판단된다. 2020년 북한의 42%를 차지하던 농경지·초지·관목지가 산림황폐화(non-reforestation) 시나리오에서 50% 수준(2050년)까지 증가할 것으로 예측되었으며, 같은 시나리오에서 산림지는 2020년 북한의 56%를 차지하고 있었지만, 지속적으로 감소하여 2050년에는 47% 수준까지 감소할 것으로 예측되었다.

산림복원(reforestation) 시나리오는 농경지·초지·관목지가 지속적으로 감소하고, 반면에 산림지는 증가할 것으로 예측되었다. 이에 따라 2020년 북한의 35%를 차지하는 농경지·초지·관목지가 지속적으로 감소하여 2050년에는 28% 수준으로 예측되었다. 산림지는 2020년 북한의 63%를 차지하는 것으로 평가되었고 지속적으로 증가하여 2050년에는 69% 수준으로 예측되었다. 따라서, 산림복원

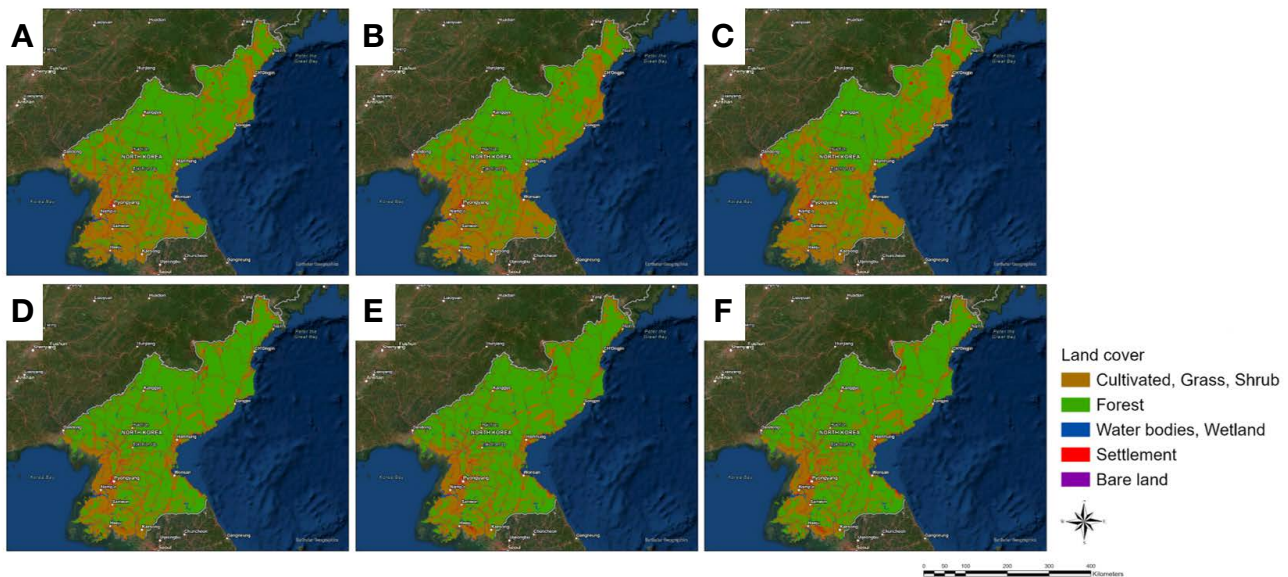


Fig. 4. Land use change scenarios in North Korea. The A, B, and C represent land use change prediction in 2030, 2040, and 2050, respectively, each using the 2000 and 2010 GlobeLand30 land use map ('non-reforestation' scenario). The D, E, and F represent land use change prediction in 2030, 2040, and 2050, respectively, using the 2010 to 2020 GlobeLand30 land use map ('reforestation' scenario).

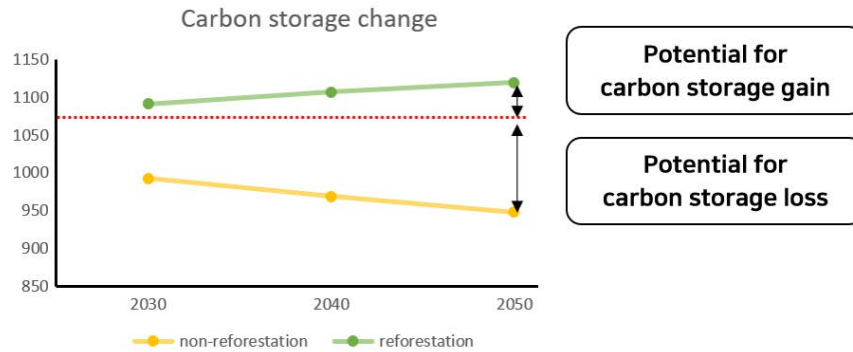


Fig. 5. Carbon storage prediction in North Korea based on land use change scenarios. Red dash line (base line) represents the carbon storage in 2020 (1,072.4 MtC) (Unit: MtC; Megatone carbon).

에 대한 대내·외 정책이 주로 시행된 시기에 따라 구분한 토지이용 공간정보를 토대로 구축한 두 시나리오에 의해 북한의 토지이용 변화는 매우 상이하고, 장기적인 탄소저장량 변화도 다양하게 변화될 것으로 예상된다.

3.2. 북한 탄소저장량 예측 평가

북한 토지이용 변화에 따른 미래 탄소저장량의 평가결과는 Fig. 5와 같다. 산림황폐화(non-reforestation) 시나리오에 따르면 탄소저장량은 2050년까지 지속적으로 감소할 것으로 나타났고, 산림복원(reforestation) 시나리오에서는 지속적으로 증가할 것으로 나타났다(Fig. 5). 이는 산림지의 탄소저장량 계수가 농경지·초지·관목지에 비해 약 2.4배 이상 크고, 본 연구에서 북한의 과거 토지이용 변화를 분석하여 구축한 시나리오의 산림지와 농경지·초지·관목지의 시계열에 따른 증감이 차이 나는 것에서 기인한 결과로 보인다. 이에 따라 기준시기인 2020년에는 북한 육상생태계가 지닌 $1,072.4 \times 10^6$ t의 탄소저장량을 지니는 것으로 평가되었고, 산림황폐화(non-reforestation) 시나리오에서는 2050년 948.6×10^6 t의 탄소를 저장하고 있는 것으로 평가되었다. 반면에 산림복원(reforestation) 시나리오에서는 2050년 $1,119.4 \times 10^6$ t의 탄소를 저장하고 있는 것으로 평가되었다.

3.3. 북한 토지이용 변화에 따른 탄소저장량 예측 평가의 한계와 의의

본 연구의 토지이용 변화 시나리오는 GlobeLand30에서 제시하는 북한의 과거 토지이용 공간정보를 대상으로

구축되었다. GlobeLand30에서 제시하는 북한 산림의 황폐화 정도는 Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO 2020)에서 제시한 북한의 산림황폐화 면적 대비 20% 과소추정된 것으로 나타났다. 그러나 FAO (2020)의 보고는 2016년까지의 북한 황폐화 경향을 대상으로 2020년의 황폐화 정도를 추정한 결과로 2010년 이후 시도된 다양한 대내·외 산림복원의 노력이 반영되지 않았을 것으로 판단된다. 특히, 북한의 대대적인 조림과 산림의 복원에 대한 가시적인 효과는 2015년 산림복구 전투 이후 나타난 점을 고려할 필요가 있다(Lim and Yeo 2022; NIFOS 2022). 따라서, 북한의 탄소저장량에 대한 예측 평가를 위해서는 산림복원에 대한 노력이 반영된 토지이용 변화 시나리오가 필요하다.

본 연구에서는 GlobeLand30의 시계열 공간정보(2000년, 2010년, 2020년)와 토지이용 변화 모델을 토대로 북한의 산림황폐화(non-reforestation)와 산림복원(reforestation) 시나리오를 구축하였다. 토지이용 변화 모델에서는 과거 시점의 토지이용 변화를 토대로 예측되는 현재 시점의 토지이용 공간정보와 현재 시점을 기반으로 구축한 토지이용 공간정보를 비교하여 그 정확성을 검증한다(Arsanjani *et al.* 2013; Bang *et al.* 2018; Li *et al.* 2020). 그러나 본 연구에서는 2010년을 기점으로 산림지의 증감이 명확히 나타나는 북한을 대상으로 토지이용 변화 예측을 시도하였기 때문에 2020년의 GlobeLand30의 공간정보와 토지이용 변화 예측결과의 검증을 실시하는데 제한이 있었다. 이러한 한계에도 불구하고 본 연구에서 개발한 토지이용 변화 시나리오는 북한 산림복원에 대한 노력 이전과 이후 시점을 고려한 토지이용 변화 시나리오

로 북한의 탄소저장량 평가를 상반되는 시각에서 할 수 있는 점에서 의의가 있다. 특히, 기존 북한 산림이 지닌 황폐화 문제에서 전환하려는 노력인 2015년 산림복구전투와 '산림건설총계획(2013~2042)'이 지속된다면 이끌어낼 수 있는 북한의 미래 탄소저장량에 대한 전망이 가능할 것으로 판단된다.

북한 육상생태계의 탄소저장량은 토지이용 시나리오에 따라 큰 차이가 발생할 것으로 예측된다. 본 연구에서 추정된 2020년 탄소저장량을 기준으로 non-reforestation 시나리오에서는 11.5%가 손실될 것으로 나타났고, reforestation 시나리오에서는 4.4%가 증가할 것으로 나타났다. 즉, 북한의 산림복원 노력이 지속된다면, 북한 산림의 회복과 함께 탄소저장량 증진이 가능할 것으로 보인다. 그러나 이는 남한의 육상생태계를 중심으로 추정된 토지이용 유형별 탄소저장량 계수(Table 3)를 활용한 결과로 북한의 실정과는 차이를 지닐 수 있다. 이는 남북관계의 특수성에 의해 직접적인 현장조사가 어려운 제한점에 의한 것으로 탄소저장량에 대한 결과를 해석할 때 고려해야 할 부분이다. 본 연구와 관련된 선행연구로는 Piao *et al.* (2016)이 있으며, 북한의 산림을 대상으로 탄소저장량 평가를 수행한 바 있다. Piao *et al.* (2016)은 북한 산림의 탄소저장량을 144.1 tC ha^{-1} 로 추정 및 적용하여 평가하였으며, 이는 Table 3에서 제시한 140.4 tC ha^{-1} 와 ha당 3.7톤의 차이를 보이고 있다. 이에 따라 육상생태계의 대부분의 탄소저장량을 지니고 있는 산림부문에서 큰 차이가 나지 않기 때문에 장기적인 탄소저장량 평가에 있어서는 무리가 없을 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서 제시한 북한이 지닌 탄소저장량 증진 잠재성에 대한 과학적 근거를 바탕으로 북한의 산림복원에 대한 노력이 지속될 수 있도록 정책적 활용성이 제고된다면, 남북협력과 함께 한반도 탄소저장량 증진에 큰 기여를 할 수 있을 것으로 판단된다.

적 요

본 연구는 북한의 과거 토지이용 변화의 경향성을 반영한 토지이용 변화 시나리오에 따라 2050년까지의 탄소저장량 변화를 평가하였다. 토지이용 변화 시나리오는 과거 시점의 상태로부터 현 상태를 예측할 수 있는 CA-Markov 모델링을 통해 구축하였으며, 이를 위해 북한 산림복원을

위한 대내·외 노력이 시도된 2010년 전후의 토지이용 공간정보를 통해 추정된 토지이용 유형별 변화 경향성을 활용하였다. 이를 통해 산림황폐화(non-reforestation)와 산림복원(reforestation) 시나리오를 마련하였으며, 토지이용 변화에 따른 북한 탄소저장량 변화를 평가하였다. 북한의 토지이용 유형별 탄소저장량은 우리나라를 대상으로 수행된 연구문헌 조사를 통해 도심지, 산림, 농경지, 초지, 나지의 지상부, 지하부, 토양, 기타 유기물에 대한 추정값을 적용하였다. 북한을 대상으로한 대내·외 산림복원 노력은 2050년의 탄소저장량을 2020년 대비 4.4% 증진시킬 수 있는 잠재력을 지닐 것으로 판단된다. 그러나 산림복원의 노력없이 황폐화가 지속된다면 2050년 탄소저장량은 2020년 대비 11.5% 감소할 것으로 예측되었다. 이에 따라 북한의 탄소저장량 증진을 위해서 대내·외의 지속적인 노력이 매우 중요할 것으로 판단된다. 따라서, 장기적으로 북한의 산림복원을 위한 노력과 협력을 추진됨에 있어 본 연구에서 제시하는 결과가 기여할 수 있길 기대한다.

CRedit authorship contribution statement

W Cho: Data curation, Writing - Original draft. I Kim: Data collecting, Literature review. D Ko: Writing - Review & Editing.

Declaration of Competing Interest

The authors declare no conflicts of interest.

사 사

이 연구는 롯데장학재단의 학술연구비 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

- Anand V and B Oinam. 2020. Future land use land cover prediction with special emphasis on urbanization and wetlands. *Remote Sens. Lett.* 11:225-234. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2019.1704304>
- Ansari A and MH Golabi. 2019. Prediction of spatial land use changes based on LCM in a GIS environment for Desert Wetlands-A case study: Meighan Wetland, Iran. *Int. Soil*

- Water Conserv. Res. 7:64–70. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2018.10.001>
- Arsanjani JJ, M Helbich, W Kainz and AD Bolorani. 2013. Integration of logistic regression, Markov chain and cellular automata models to simulate urban expansion. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 21:265–275. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2011.12.014>
- Bhang KJ, T Sarker and JD Lee. 2018. Prediction of urban land cover change using multilayer perceptron and Markov chain analysis. *J. Korean Soc. Surv. Geod.* 36:85–94. <https://doi.org/10.7848/ksgpc.2018.36.2.85>
- Bradley AV, IM Rosa, A Brandao, S Crema, C Dobler, S Moulds, SE Ahme, T Carneiro, MJ Smith and RM Ewers. 2017. An ensemble of spatially explicit land-cover model projections: prospects and challenges to retrospectively evaluate deforestation policy. *Model. Earth Syst. Environ.* 3:1215–1228. <https://doi.org/10.1007/s40808-017-0376-y>
- Chen J, J Chen, A Liao, X Cao, L Chen, X Chen, C He, G Han, S Peng and M Lu. 2015. Global land cover mapping at 30m resolution: A POK-based operational approach. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 103:7–27. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.09.002>
- Cho W. 2022. Spatio-temporal simulation of ecosystem services in the Han River Basin, South Korea: Effects of climate change, forest Management, and land cover change. Ph.D. dissertation. Kookmin University. Seoul, Korea.
- Choi HA, SW Bae, SG Lee, B Seliger and WK Lee. 2017. Selecting tree species for use in North Korea's forest restoration. *Korean J. Unification Aff.* 29:37–56. <https://doi.org/10.46561/KUA.201729.1.02>
- Chung MG, H Kang and SU Choi. 2015. Assessment of coastal ecosystem services for conservation strategies in South Korea. *PLoS One* 10:e0133856. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0133856>
- FAO. 2020. Global Forest Resources Assessment 2020. United Nations, 2020.
- Gagnic PA. 2017. Markov Chains: From Theory to Implementation and Experimentation. Wiley. New York, US.
- Hasan S, W Shi, X Zhu, S Abbas and HUA Khan. 2020. Future simulation of land use changes in rapidly urbanizing South China based on land change modeler and remote sensing data. *Sustainability* 12:4350. <https://doi.org/10.3390/su12114350>
- Ho TK. 1995. Random decision forests. pp. 278–282. In: Proceedings of 3rd International Conference on Document Analysis and Recognition. Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society. Montreal, Canada. <https://doi.org/10.1109/ICDAR.1995.598994>
- Hong SY, YS Zhang, YH Kim, MS Kim, E Choe and SK Ha. 2010. A study on estimating soil carbon storage in Asian countries and Korea. pp. 148–149. In: Proceedings of 2010 Korean Society of Soil Science and Fertilizer Fall Meeting. Korean Society of Soil Science and Fertilizer. Daegu, Korea.
- Ji D. 2016. Exclusive: N. Korean Warning Threatens Deforesters with Execution. *NK News*. <https://www.nknews.org/2016/11/exclusive-n-korean-warning-threatens-deforesters-with-execution>. Accessed August 23, 2023.
- Jun C, Y Ban and S Li. 2014. Open access to Earth land-cover map. *Nature* 514:434–434. <https://doi.org/10.1038/514434c>
- KFS. 2016. 2016 Annual Report on Forest and Forestry Trends. Korea Forest Service. Daejeon, Korea.
- Kim D, CH Lim, C Song, WK Lee, D Piao, S Heo and S Jeon. 2016b. Estimation of future carbon budget with climate change and reforestation scenario in North Korea. *Adv. Space Res.* 58:1002–1016. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.05.049>
- Kim J, SH Han, H Chang, T Kim, I Jang, W Oh, C Seo, W Lee and Y Son. 2016a. Quantitative assessment of climate regulating ecosystem services using carbon storage in major Korean ecosystems. *Korean J. Environ. Biol.* 34:8–17. <https://doi.org/10.11626/KJEB.2016.34.1.008>
- Kim SY, SY Park and KS Park. 2016. A study on new change of forest management in DPRK by introducing agroforestry of sloping land management. *Korean J. Unification Aff.* 28:127–157.
- KINU. 2014. 'Green Detente' Action Strategy: Formation of Environmental Community and Peaceful Ecological Use of DMZ in Border Region. Korea Institute for National Unification. Seoul, Korea.
- Lee SH. 2004. Situation of degraded forest land in DPRK and strategies for forestry cooperation between South and North Korea. *J. Agric. Life Sci.* 38:101–113.
- Li X, Y Zhou and W Chen. 2020. An improved urban cellular automata model by using the trend-adjusted neighborhood. *Ecol. Process.* 9:1–13. <https://doi.org/10.1186/s13717-020-00234-9>
- Lim CH and HC Yeo. 2022. Understanding the long-term vegetation dynamics of North Korea and their impact on the thermal environment. *Forests* 13:1053. <https://doi.org/10.3390/f13071053>
- Mwabumba M, BK Yadav, MJ Rwiza, I Larbi and S Twisa. 2022. Analysis of land use and land-cover pattern to monitor dynamics of Ngorongoro world heritage site (Tanzania) using hybrid cellular automata-Markov model. *Curr. Res. Environmental Sustainability* 4:100126. <https://doi.org/10.1016/j.crsust.2022.100126>
- NIFOS. 2014. Governance Establishment and Operation Plan for Forest Restoration Support in North Korea. National Institute of Forest Science. Seoul, Korea.

- NIFOS. 2015. Compilation of National Forest Greenhouse Gas Statistics Using Carbon Emission Factors. National Institute of Forest Science. Seoul, Korea.
- NIFOS. 2022. Analysis of North Korean Forest Trends in the First Half of 2021. National Institute of Forest Science. Seoul, Korea.
- Park K, S Lee and S Park. 2009. A study on the North Korea's change of forest policy since the economic crisis in 1990s. Korean J. Unification Aff. 21:459-492.
- Park KS and SY Park. 2012. The rehabilitation of North Korea's devastated forest with the focus on the case of South Korea. North Korean Studies 8:133-159. <https://doi.org/10.23040/kcdoi.2012.8.1.005>
- Park KS. 2013. Forest Condition and Policy in North Korea. Korea Rural Economic Institute Quarterly Agricultural Trends in North Korea 15:3-23.
- Piao D, WK Lee, Y Zhu, M Kim and C Song. 2016. Assessment of forest degradation and carbon storage for REDD+ project in North Korea. Korean J. Environ. Biol. 34:1-7. <https://doi.org/10.11626/KJEB.2016.34.1.001>
- Raj A and LK Sharma. 2022. Assessment of land-use dynamics of the Aravalli range (India) using integrated geospatial and CART approach. Earth Sci. Inform. 15:492-522. <https://doi.org/10.1007/s12145-021-00753-9>
- The Government of the Republic of Korea. 2020. 2050 Carbon Neutral Strategy of the Republic of Korea: Towards a Sustainable and Green Society. The Government of the Republic of Korea. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/LTS1_RKorea.pdf Accessed August 24, 2023
- Tomasso LP and M Leighton. 2014. The impact of land use change for greenhouse gas inventories and state-level climate mediation policy: a GIS methodology applied to Connecticut. J. Environ. Prot. 5:1572. <https://doi.org/10.4236/jep.2014.517149>
- Wolfram S. 1983. Statistical mechanics of cellular automata. Rev. Mod. Phys. 55:601. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.55.601>