

산림경영활동에 따른 수종별 지상부생물량 및 목재생산량 변화 모델링: 가리왕산 모델숲을 대상으로

조원희¹ · 임원택² · 최원일³ · 양희문³ · 고동욱^{2*}

¹국민대학교 산학협력단, ²국민대학교 산림환경시스템학과, ³국립산림과학원 산림생태연구과

Modeling the Effects of Forest Management Scenarios on Aboveground Biomass and Wood Production: A Study in Mt. Gariwang, South Korea

Wonhee Cho¹, Wontaek Lim², Won Il Choi³, Hee Moon Yang³ and Dongwook W. Ko^{2*}

¹Industry Academic Cooperation Foundation, Kookmin University, Seoul 02707, Korea

²Department of Forest Resources, Kookmin University, Seoul 02707, Korea

³Division of Forest Ecology and Climate Change, National Institute of Forest Science, Seoul 02445, Korea

요약: 우리나라의 산림은 조림과 산림보호정책의 결과로 임목축적이 크게 증가하였으며, 이에 따라 공익적 가치도 매우 높게 평가받게 되었다. 최근 벌기령이 도래함에 따라 간벌과 수확벌채 등의 시업을 비롯한 산림경영활동의 필요성이 대두되고 있으며, 이에 따라 산림경영활동의 장기적인 영향을 과학적으로 비교분석하는 것은 매우 중요한 일이다. 이 연구는 가리왕산 모델숲을 대상으로 실시되었으며, 산림경관모형 LANDIS-II를 활용하여 주요 16개 수종에 대한 식생자료와 환경 특성 모수, 4가지 산림경영활동을 반영하여 수행한 모의를 통해 추정된 수종별 지상부생물량 변화를 바탕으로 산림경영활동이 식생의 천이와 목재생산량에 미칠 수 있는 영향을 평가하였다. 모형에 적용된 산림경영활동은 벌채강도와 벌채주기, 벌채기간에 따라 택벌림(Selection), 산벌림(Shelterwood), 이단림(Two-stories)과 비시업(no-mgt)으로 구성되어있으며, 이를 시나리오로 모형에 적용하여 산림경영활동에 따른 200년간의 지상부생물량의 변화를 통해 산림경관 변화를 모의하였다. 모의 결과 가리왕산 모델숲의 총 지상부생물량은 간벌과 수확벌채 시업 직후 크게 감소하였으나, 시나리오에 따라 수확벌채 시업 후 15년에서 50년이 지나며 시업 전 수준으로 회복되었고 200년 후에는 산림경영활동이 전혀 없는 시나리오보다 더 많은 지상부생물량을 지닐 것으로 평가되었다. 특히 내음성이 양수와 중성수로 분류된 수종의 지상부생물량은 수확벌채 시업 직후 크게 감소하였지만 신규개체의 발아와 정착으로 지상부생물량이 일부 회복하는 경향을 보였으며, 음수인 수종은 초기 수확벌채 시업에서 임령이 낮아 시업 대상으로 선정되지 않고 지속적으로 성장하여 모의 100년 이후에는 주요 우점수종이 되는 것으로 나타났다. 각 시나리오의 최종 누적 목재생산량은 택벌림 산림경영활동 시나리오에서 545.6 ton/ha, 산벌림 산림경영활동 시나리오에서 141.6 ton/ha, 이단림 산림경영활동 시나리오에서 299.9 ton/ha일 것으로 추정되었다. 목재생산량의 수종구성은 벌채강도와 벌채기간에 따라 차이를 보였으며, 특히 택벌림과 이단림의 산림경영활동 시나리오에서 수확벌채 시업 초기 목재생산량은 양수와 중성수 비율이 큰 것으로 나타났으나 시간이 지남에 따라 음수의 비율이 증가하였다. 이에 따라 산림경영활동은 산림생태계의 수종별 지상부생물량과 수확벌채 시업에 의한 목재생산량에도 영향을 끼치는 것으로 나타났다. 따라서, 본 연구에서는 산림경관모형 LANDIS-II를 활용한 시공간적 분석의 가능성을 규명하였으며, 이를 통해 산림생태계 관리 목표에 부합하는 산림경영활동 선정에 대한 기초자료를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

Abstract: The forest protection policies implemented in South Korea have resulted in the significant accumulation of forest. Moreover, the associated public interest has also been closely evaluated. As forests mature, there arises a need for forest management (FM) practices, such as thinning and harvesting. It is therefore essential to perform a


* Corresponding author

E-mail: dwko@kookmin.ac.kr

ORCID

Wonhee Cho  <https://orcid.org/0000-0002-9598-6188>

Wontaek Lim  <https://orcid.org/0000-0002-5872-1121>

Dongwook W. Ko  <https://orcid.org/0000-0002-6944-0261>

scientific analysis of the long-term effects of FM. In this study, conducted in Mt. Gariwang, the effect of FM on forest succession and wood production (WP) were evaluated based on changes in aboveground biomass (AGB) using the LANDIS-II model. The FM consists of three scenarios (Selection, Shelterwood, and Two-stories), characterized based on the harvest intensity, frequency, and period. The model was applied to changes in the forest over 200 years. All scenarios show that the total AGB decreased immediately after thinning and harvesting. However, AGB recovery time differed among scenarios, with recovery to preharvest level occurring from 15 to 50 years after harvest; further, after 200 years, harvested forests had a greater total AGB than forests without FMs. In particular, the changes in AGB of each species was different depending on its shade tolerance. The AGB of currently dominant shade-intolerant and mid-tolerant species decreased dramatically after harvesting. However, shade-tolerant species, dominant in the understory, continued to grow but were not harvested due to their small size. The cumulative WP for each scenario was estimated at 545.6, 141.6, and 299.9 tons/ha in Selection, Shelterwood, and Two-stories, respectively. The composition of WP differed according to harvest intensity and period. Most WP originated from shade-intolerant and mid-tolerant species in the early period. Later, most WP was from shade-tolerant species, which became dominant. The modeling approach used in this study is capable of analyzing the long-term effects of FM on changes in forests and WP. This study can contribute to decision making to guide FM methods for a variety of purposes, including WP and controlling forest composition and structure.

Key words: LANDIS-II, forest management, forest landscape model, ecosystem modeling, Mt. Gariwang

서론

우리나라 산림은 1970년대 실시된 치산녹화 사업과 지속적인 보호 정책의 효과로 임목축적량(161.4 m³/ha)의 상승과 221조원에 이르는 공익적 가치를 지니게 되었다(Korea Forest Service, 2020). 임목축적량의 상승은 온실가스의 흡수·저장과 밀접한 관련이 있으며, 산림의 공익적 가치 중 34.2%를 차지하고 있다. 특히, 2050 탄소중립 시나리오(The Government of the Republic of Korea, 2020)에 따르면 산림생태계는 탄소흡수원으로 중요성이 증대되고 있으며 목재생산에 따른 탄소고정 효과도 기대되고 있는 만큼 온실가스 저장 기능 증대로 인한 공익적 가치의 상승을 기대할 수 있다. 그러나 2020년 기준 국내 산림의 대부분이 IV~V영급 임분이므로 향후 VI영급 이상의 노령임분의 비율이 증가할 것으로 예상되며, 이에 따라 순생장의 감소로 인해 온실가스(탄소) 흡수원으로서의 기능이 크게 저하될 것으로 전망되고 있다(Korea Forest Service, 2018). 이에 따라 산림경영활동(forest management)을 통한 영급구조 개선과 탄소흡수원으로서의 기능 보전 및 증진, 목재생산에 대한 연구가 필요한 시점이다.

우리나라의 산림경영활동에 대한 연구는 양질의 목재를 지속적으로 생산할 수 있는 법정림 조성을 목적으로 수행되었다(National Institute of Forest Science, 2010; Korea Rural Economic Institute, 2013; 2014; 2019). 특히, 강원도 평창군과 정선군에 위치한 가리왕산 모델숲은 지난 30년간 우리나라의 지속가능한 산림경영활동을 목표로 개발된 천연활엽수림에 대한 시업과 이에 대한 모니터링 연구가 수행된 지역이다(National Institute of Forest Science,

2018). 또한, 산림경영활동이 실시된 실연지를 대상으로 임분구조의 변화, 하층식생과 절지류의 다양성 변화 모니터링 연구가 지속적으로 수행되고 있다(Park et al., 2016; Sung et al., 2014; Kim et al., 2012). 이와 함께 장기간에 걸친 수확별채 시업에 따른 식생천이와 벌채량, 경제적 이익에 대한 연구가 요구되고 있으나, 시업에 대한 현장 중심의 연구는 막대한 비용과 시간, 공간이 필요하고 산림생태계의 수종별 성장, 경쟁, 고사 등의 복잡성으로 인해 결과를 해석하는 데 어려움이 있다(Barros et al., 2017; Gustafson et al., 2010; Baker, 1995). 따라서, 많은 연구에서 산림경관모형(Forest Landscape Models, FLMs)을 활용해 산림경영활동에 의한 효과 평가를 수행하고 있다(Bu et al., 2008; Fraser et al., 2013; Kline et al., 2016; Haga et al., 2018).

산림경관모형 LANDIS-II (LANDscape DIsturbance and Succession)는 산림생태계의 성장과 교란을 모의(simulation)하며, 산림경영활동을 다양한 시나리오로 구성하여 적용할 수 있는 특징을 지니고 있다(He et al., 1999; Scheller et al., 2004; Bruijn et al., 2014; Haga et al., 2018; Blumstein and Thompson, 2015). 이를 통해 산림경영활동 시나리오에 따른 산림생태계의 회복력, 벌채량 추정, 탄소저장량 및 흡수량 추정, 재해저감 효과 등 다양한 연구에 활용되고 있다(Maxwell et al., 2022; Dobre et al., 2022; McDowell et al., 2021; Mina et al., 2021). LANDIS-II를 활용한 국내 연구는 Cho et al.(2020)이 우리나라 주요수종에 대한 모수화(parameterization)와 함께 적용성에 대해 평가하여 다양한 시나리오 기반의 연구가 수행될 수 있는 기반이 마련되어 있다. 따라서, 산림경영활동에 대한 장기적 효과예측

연구를 위한 모형적 접근으로 LANDIS-II를 활용하는 것을 고려해볼 필요가 있다.

이에 본 연구에서는 가리왕산 모델숲을 대상으로 LANDIS-II 모형을 활용하여 다양한 산림경영활동 시나리오에 의한 산림경관의 변화를 모의하고 그 결과를 비교·분석하였다. 산림경영활동 시나리오는 벌채강도, 벌채빈도, 벌채면적을 고려하여 택벌림, 산벌림, 이단림, 그리고 비시업의 4가지를 적용하였으며, 200년간의 산림생태계의 변화를 모의하였다. 산림경영활동의 모의 결과는 다양한 생물량에 기반하여 분석하였다. 각 시나리오별로 1) 총 지상부생물량변화, 2) 수종별 내음성 특성에 따른 지상부생물량의 변화, 그리고 3) 목재생산량의 변화를 분석하였고, 이를 종합하여 산림경영활동에 따른 식생천이와 산림경관 변화에 대한 평가를 시도하였다.

재료 및 방법

1. 연구대상지

가리왕산 모델숲은 4,029 ha의 면적이 강원도 정선군 정선읍 북면과 평창군 진부면에 걸쳐 있으며 산정상부는 N 37° 27' 31", E 128° 33' 57"에 위치하고 있다(Figure 1). 가리왕산 모델숲은 서쪽으로 중왕산(1,376 m), 청옥산(1,245 m)을 마주하고 동쪽은 중봉(1,433 m), 하봉(1,380 m)이 이어지는 산악지형을 이루고 있다. 가리왕산은 산림유전자원보호구역으로 아고산 희귀식물 자생지와 경관보전이 필요한 진귀한 임상유형으로 구성되어 있어 다양한 식물상에 관한 연구가 지속적으로 이루어지고 있으며,

1990년부터 우리나라 온대북부 천연림에 적합한 산림경영활동 시업기술의 개발 및 적용과 그 효과를 모니터링하는 연구가 진행되고 있다(Lee and Kim, 1994; Byun et al., 2013; Kim et al., 2012; Choi et al., 2013; Sung et al., 2014).

본 연구의 대상지는 가리왕산 모델숲으로 해발고도는 444~1,551 m의 분포를 보이며, 800 m 이상의 고도대가 전체 면적의 73.3%를 차지한다. 연구대상지에 가장 근접한 대관령 기상관측소에 따르면 연평균 기온은 6.3°C, 연평균 최고기온은 11.1°C, 연평균 최저기온은 1.7°C이다. 연구대상지의 임상은 제5차 임상도 기준으로 활엽수림 69.6%, 침엽수림 25.5%, 혼효림 4.0%이고 국립산림과학원에서 실시한 5년간(2011~2015)의 식생조사에 의하면 신갈나무 임상이 전체의 34.6% 이상으로 구성되어 있다. 임분의 층위구조는 활엽수림을 중심으로는 상층에 신갈나무가 우점하고 중·하층에는 내음성이 강한 피나무, 고로쇠나무, 난티나무 등이 분포하며, 침엽수림은 상층에 소나무, 일본잎갈나무가 우점하고 중·하층에는 신갈나무, 피나무, 고로쇠나무 등 상층 수종에 비해 상대적으로 내음성이 강한 중성수와 음수가 분포한다.

2. 모형 소개

본 연구에서 활용한 LANDIS-II 모형은 식생의 성장에 영향을 주는 환경변수의 조합으로 구획된 생태역(ecoregion)과 수종, 영급의 구성 정보를 반영하는 초기식생형(initial-community)을 공간입력변수로 활용하며, 다양한 천이와 교란 알고리즘을 구현한 다수의 익스텐션(extension)을 연구자가 필요에 따라 활용하여 산림경관의 변화를 모의할

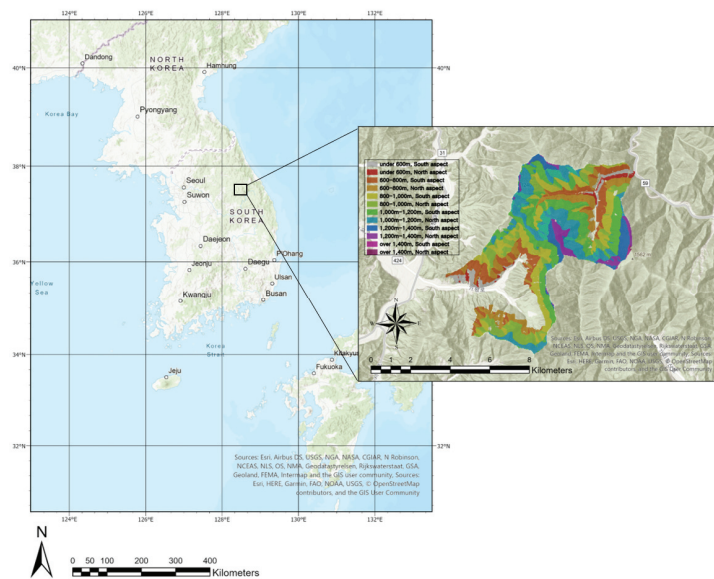


Figure 1. The ecoregion in Mt.Gariwang study area

수 있다(Scheller et al., 2007). 모형은 초기식생형에 입력된 가장 오래된 영급이 정착한 과거 시점부터 모의를 시작하며, 초기식생형에 기반한 연구대상지의 현 상태를 제시하는 특징이 있다. 즉, 초기식생형에 구성된 가장 오래된 수종의 입력이 70년생이라면, 모형에서는 초기시점을 기준으로 70년 이전부터 모의가 시작된다. 본 연구에서는 LANDIS-II의 Biomass Succession 익스텐션으로 수목의 성장과 식생천이를, Biomass Harvest 익스텐션을 사용하여 산림경영활동 시나리오에 따른 산림경관의 변화를 모의하였다.

Biomass Succession 익스텐션은 수종별·영급별 지상부 생물량(aboveground biomass, AGB)의 변화를 시·공간적으로 추정하여 그에 기반한 수목의 성장, 고사, 경쟁 등을 모의한다. Biomass Succession의 AGB는 지상부에 존재하는 목질부와 잎을 모두 포함하며, 이에 대한 변화를 모의하는 데 적용되는 주요 입력자료는 기후특성과 수종별 특성(내음성, 잎의 질소함량비, 광포화도 등)에 따라 추정된 생태역별·수종별 순성장량(Maximum Aboveground Net Primary Production, 변수명: ANPPmax)과 최대 생물량(Maximum biomass, 변수명: Maxbiomass)이다. 이를 기반으로 각 생태역에서 지정된 시간단위(timestep)동안 발생하는 수종별 성장을 모의하고 종자 확산거리와 정착확률 등에 기반하여 수공간 경쟁을 모의한다(Aber et al., 1995; Scheller and Mladenoff, 2004).

Biomass Harvest 익스텐션은 연구자가 지정한 산림경영활동의 공간적 구획인 관리지역(management area)에서 대상수종과 대상영급, 시업시기, 벌채강도, 벌채빈도 등의

변수를 모수화하여 다채로운 산림경영활동 시나리오를 구성할 수 있다. 이 익스텐션을 활용하여 산림경영활동에 따라 발생하는 벌채량을 추정하고 이후 산림에서 나타나는 시업의 복합적인 효과를 모의할 수 있다(Gustafson et al., 2000).

3. 모형 입력자료

1) LANDIS-II 입력자료

본 연구에서 활용한 LANDIS-II 모형의 입력자료는 생태역(ecoregion)과, 초기식생형(initial community)이 있다. 생태역은 연구대상지의 환경특성을 반영하는 공간 입력자료로써 기후, 토양, 지형 등 수목생장의 환경인자가 동질적인 지역으로 정의된다(He and Mladenoff, 1999; Scheller et al., 2007). 본 연구에서는 30 m 해상도의 수치표고모형(Digital Elevation Model, DEM)을 활용하여 6가지 고도 등급과 2가지 사면특성을 조합하여 총 12종류의 생태역을 지정하였으며, 이는 총 44,763개의 셀(cell)로 구획되었다(Table 1).

초기식생형 구성에 포함되는 대상수종은 가리왕산 모델 숲에서 수행된 식생조사를 바탕으로 신갈나무(*Quercus mongolica*), 물푸레나무(*Fraxinus rhynchophylla*), 피나무(*Tilia amurensis*), 고로쇠나무(*Acer pictum var. mono*), 박달나무(*Betula schmidtii*), 느릅나무(*Ulmus davidiana*), 거제수나무(*Betula costata*), 난티나무(*Ulmus laciniata*), 층층나무(*Cornus controversa*), 소나무(*Pinus densiflora*), 떡갈나무(*Quercus dentata*), 굴참나무(*Quercus variabilis*), 일본잎갈나무(*Larix kaempferi*), 자작나무(*Betula platyphylla*),

Table 1. Description of each ecoregion in study site.

Ecoregion	Environment variables		Area %
	Elevation	Aspect	
eco11	400~600 m	South ^{a)}	3.0
eco12		North ^{b)}	1.6
eco21	600~800 m	South	11.5
eco22		North	10.7
eco31	800~1000 m	South	16.3
eco32		North	18.1
eco41	1000~1200 m	South	14.3
eco42		North	14.8
eco51	1200~1400 m	South	5.2
eco52		North	3.7
eco61	1400~1600 m	South	0.6
eco62		North	0.3

a) 0°~135°, 315°~360° b) 135°~315°

전나무(*Abies holophylla*), 잣나무(*Pinus koraiensis*)를 선정하였다(National Institute of Forest Science, 2018). 초기식생형은 모형에 입력되는 초기 수종 및 영급 구성의 공간분포를 나타내며, 국립산림과학원에서 실시한 184개 표본점의 식생조사자료와 항공영상을 통해 제작한 통합 식생도에 기반하여 총 30가지의 식생형을 구성하였다.

2) LANDIS-II Biomass succession 입력자료

Biomass succession 익스텐션의 성장과 관련있는 ANPPmax는 수종별 생리특성과 기후와의 관계를 이용하여 연단위 성장량을 추정하는 PnET for landis (Photosynthesis and EvapoTranspiration model for Landis) (Xi and Xu, 2010) 모형을 활용하여 모의기간에 걸쳐 각 생태역별로 추정하였다(Table 2). 수종별 생리특성 모수는 Cho et al. (2020)이 제시한 모수를 활용하였고, 필요한 경우 Cho (2018)를 참고하여 추정하였다. 기후특성은 한반도 디지털 산지기후도(National Institute of Forest Science, 2013)에서 제시한 평년기후를 사용하였다(Table 3). 수종별 최대 성장량을 나타내는 Maxbiomass는 Cho et al.(2020)에서 추정된 값을 활용하였다.

3) LANDIS-II Biomass Harvest 입력자료(산림경영활동 시나리오)

산림경영활동은 Biomass Harvest 익스텐션을 통해 적용하였다. 본 연구에서는 가리왕산 모델숲을 관리지역으로 설정하고 과거에 가리왕산 모델숲에서 수행된 시업에 대한 문헌조사를 통해 산림경영활동 시나리오를 구축하였다. 대표적으로 과거에 수행된 산림경영활동은 천연활엽수림에 대한 택벌림, 산벌림, 이단림 임분개선 시업이 있으며, 이는 임분의 등급에 따라 상이한 간벌강도를 적용하여 진행되었다(National Institute of Forest Science, 2018; Sung et al., 2014).

가리왕산 모델숲에서는 목표로 하는 수확벌채 시업 시점은 산림경영활동에 따라 차이를 보인다. 아직까지 실제로 수확벌채 시업이 실시되지는 않았지만, 택벌림은 전체 임분의 재적 250 m³/ha와 각 등급별 재적의 비율이 2:3:5 (상층:중층:하층)로 대경급 비율이 50% 이상이 되는 시점, 산벌림은 전체 임분의 재적 200 m³/ha와 대경급 재적이 전체의 50%가 되는 시점, 이단림은 대경급의 재적 150 m³/ha 이상이 되는 시점을 목표로 한다(National Institute of Forest Science, 2018). 이 연구에서는 National Institute of Forest Science(2019)에서 제시한 임분재적의 지상부생물량 환산식과 등급을 임분의 층위 구조로 재구분하여 지상부생물량과 상층(VI영급 이상), 중층(III~VI영급), 하층

(III영급 미만)에 따른 택벌림, 산벌림, 이단림 산림경영활동 시나리오를 구축하였다.

산림경영활동 시나리오는 시업을 실시하는 택벌림(Selection), 산벌림(Shelterwood), 이단림(Two-stories)과 시업을 실시하지 않는 비시업(no-mgt) 시나리오로 구성된다(Figure 2). 모든 시나리오는 모의 시작 시점으로부터 200년간 구동되었다. 각 시나리오는 가리왕산 모델숲에서 이미 진행된 산림경영활동 특성에 맞춘 임분개선 시업을 모의 초기에 적용하였다.

택벌림 시나리오(Selection scenario)는 모의 초기에 임분개선을 위해 상층 지상부생물량 18%, 중층 생물량 15%, 하층 생물량 20%의 간벌 시업을 실시하고, 층위별 생물량이 2:3:5의 비율을 지니는 동시에 지상부생물량이 257 ton/ha 이상에 도달하는 시점으로 추정된 40년 후부터 10년마다 60%의 벌채강도로 100년간 상층 식생에 대해 수확벌채 시업을 실시하였다. 산벌림 시나리오(Shelterwood scenario)는 초기에 지상부생물량을 상층 17%, 중층 10%, 하층 62% 강도로 간벌 시업을 실시하고, 이후 전체 임분의 지상부생물량이 205 ton/ha에 도달하는 동시에 상층의 지상부생물량이 50% 이상을 차지하는 35년부터 15년마다 20%, 35%, 45%의 강도로 상층 식생에 대해 수확벌채 시업을 실시하였다. 이를 통해 전체 모의기간 동안 상층부에 대해 100% 벌채하여 산벌림의 수종갱신 목표를 달성하도록 하였다. 이단림 시나리오(Two-stories scenario)는 초기에 지상부생물량을 상층 23%, 중층 50%, 하층 25% 강도로 간벌 시업을 실시하여 상층과 하층 중심의 층위구조로 개선하고, 상층의 지상부생물량이 154 ton/ha 이상에 도달하는 65년에 90% 강도의 상층 식생 수확벌채 시업을 실시하였다. 그 후 60년이 더 지난 후 잔존한 하층이 상층을 형성하면 90% 강도의 수확벌채 시업을 추가로 진행하도록 구축하였다.

4. 모형의 검증

모형의 검증은 모의 초기 시점(2015년)의 지상부생물량과 국립산림과학원에서 실시한 5년간(2011~2015) 조사결과에서 추정된 지상부생물량을 비교하여 실시하였으며, 연구대상지의 800 m 이상 지역의 총 지상부생물량과 수종별 지상부생물량을 기반으로 한다. 모형의 결과는 입력한 초기식생형을 기준으로 가장 임령이 높은 소나무 식생형 6영급에 따라 70년 기간의 수종간 생장이 반영된 결과이다. 검증에 활용된 조사자료에 기반한 총 지상부생물량은 연구대상지의 73%를 차지할 뿐 아니라 조사자료도 풍부한 800 m 이상을 대상으로 추정하였고, 이를 모의 결과와 t검정을 실시하여 비교하였다. 수종별 지상부생물량은

Table 2. Parameter sets for ANPPmax and Maxbiomass for each ecotypeUnit: g/m²

Species	ANPPmax												Max biomass
	eco11	eco12	eco21	eco22	eco31	eco32	eco41	eco42	eco51	eco52	eco61	eco62	
<i>Q. mongolica</i>	634	607	655	627	665	639	670	644	676	649	677	657	32279
<i>F. rhynchophylla</i>	546	527	568	547	580	559	585	566	593	574	596	582	23267
<i>T. amurensis</i>	563	542	581	561	591	571	596	575	602	583	603	587	27552
<i>A. pictum var. mono</i>	547	531	564	546	571	554	575	559	580	563	581	569	24851
<i>B. schmidtii</i>	440	413	491	463	524	497	547	517	565	538	576	555	26700
<i>U. davidiana</i>	579	558	595	575	606	584	610	589	616	595	617	601	22628
<i>B. costata</i>	484	462	518	494	538	514	552	528	566	542	572	553	20360
<i>U. laciniata</i>	598	574	632	609	651	627	664	637	675	650	681	660	18506
<i>C. controversa</i>	475	459	493	478	504	489	510	495	518	501	519	508	22769
<i>P. densiflora</i>	372	363	377	368	379	369	379	370	381	372	382	365	24863
<i>Q. dentata</i>	561	537	581	558	590	568	595	573	602	581	603	588	30683
<i>Q. variabilis</i>	519	496	544	521	559	535	567	543	576	553	578	561	28737
<i>L. kaempferi</i>	310	301	318	309	325	315	329	319	333	324	336	329	23052
<i>B. platyphylla</i>	407	387	439	420	459	441	474	454	485	468	494	477	30436
<i>A. holophylla</i>	310	303	333	325	349	340	359	350	369	359	376	370	19985
<i>P. koraiensis</i>	403	395	408	399	409	400	409	400	411	402	412	405	26745

Table 3. PnETforlandis parameters for ANPPmax estimation.

Scientific name	FolN ^{a)} (%)	SLWmax ^{b)} (g/m ²)	Halfsat ^{c)} (W/m ²)	Topt ^{d)} (°C)	Tmin ^{e)} (°C)	Longevity (year)	Shade tolerance
<i>Q. mongolica</i>	2.3	80	388	21	3.8	300	3
<i>F. rhynchophylla</i>	1.8	80	388	20	0.9	300	3
<i>T. amurensis</i>	2	73	370	3.1	2	325	4
<i>A. pictum var. mono</i>	1.8	65	300	21	2.3	350	5
<i>B. schmidtii</i>	2.4	90	500	18	1.1	275	2
<i>U. davidiana</i>	1.9	84	425	21	3.1	300	3
<i>B. costata</i>	2.1	88	500	19	0.1	250	1
<i>U. laciniata</i>	2	90	370	19	2.9	325	4
<i>C. controversa</i>	1.8	67	400	21	3.5	300	3
<i>P. densiflora</i>	1.8	263	600	2.9	21	250	1
<i>Q. dentata</i>	2	80	425	21	3.7	275	2
<i>Q. variabilis</i>	2.3	80	500	21	3.7	250	1
<i>L. kaempferi</i>	2.2	99	575	21	2.9	250	1
<i>B. platyphylla</i>	1.9	85	575	19	0	250	1
<i>A. holophylla</i>	1.8	290	425	16	0.5	300	3
<i>P. koraiensis</i>	1.5	232	385	20	1	325	3

^{a)}Foliar Nitrogen, ^{b)}Maximum Specific Leaf Weight, ^{c)}Half saturation, ^{d)}Optimum temperature for growth, ^{e)}Minimum temperature for growth

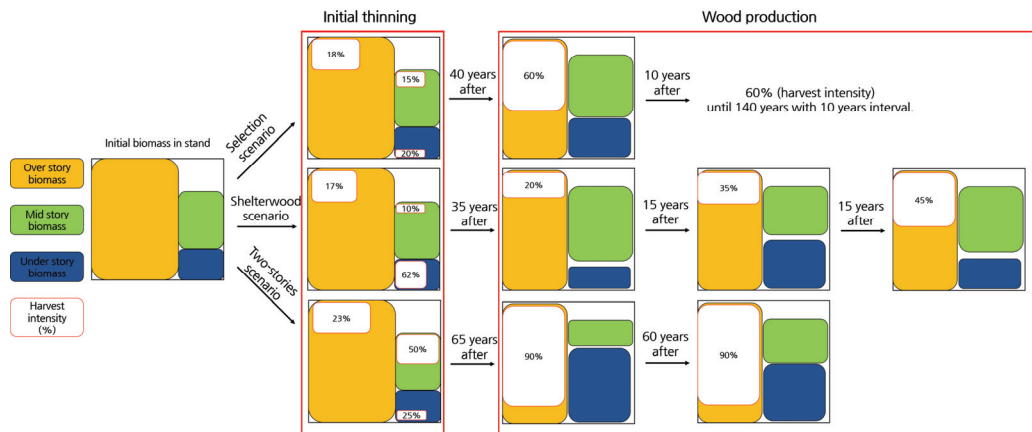


Figure 2. The harvest intensity and period in forest management scenarios (Selection, Shelterwood, Two-stories).

연구대상지의 총 지상부생물량 중 수종별 구성비를 비교하였고, 이와 함께 각 수종별 지상부생물량의 비교도 실시하였다. 수종별 지상부생물량의 비교는 우점 수종의 영향을 최소화하기 위해 자연로그를 적용하였다.

5. 모형 구동 및 산림경영활동 평가

이 연구는 3가지 산림경영활동 시나리오와 비사업 시나리오에 대한 200년간 모의를 실시하였으며, 각 시나리오별로 10회 반복구동하였다. 산림경영활동이 임분개선과 목재생산량에 끼치는 영향을 평가하기 위해 모의를 통해 1) 총 지상부생물량 변화, 2)내음성에 따른 지상부생물량 변화, 3)목재생산에 대해 시계열적 변화를 분석하였다. 이를 통해 LANDIS-II를 활용하여 가리왕산 모델숲의 산림경관 변화를 모의함에 있어 산림경영활동이 산림생태계의 임목재적(총 지상부생물량)과 식생의 천이과정, 수확별채 시업에 의한 목재생산에 끼치는 영향을 평가하고자 하였다.

1) 총 지상부생물량 변화

산림경영활동의 다양한 시업은 단기적으로 산림생태계의 총 지상부생물량을 크게 감소시킬 수 있지만, 임분개선과 하층식생의 성장, 신규수종의 정착 등에 따라 총 지상부생물량을 점진적으로 회복할 수 있다(McDowell et al., 2021; Mina et al., 2021). 이에 따라 산림경영활동의 시업 특성(벌채강도, 벌채면적, 벌채주기 등)이 산림경관 변화에 끼치는 영향을 평가할 때 산림경관의 총 지상부생물량의 변화를 시계열적으로 살펴보는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 산림경영활동 시나리오의 간벌과 다양한 수확별채 시업 특성에 따라 연구대상지의 총 지상부생물량을 시계열적으로 분석하여 다양한 시업특성이 연구대상지가 지닌 총 지상부생물량의 단기적 감소와 장기적 증진 효과에 대해 평가하였다.

2) 내음성에 따른 수종별 지상부생물량 변화

산림경영활동에 의한 인위적인 교란은 기존 식생구성을 변화시키는 요소로 작용할 수 있다(Feng et al., 2014; Taylor et al., 2013; Haq et al., 2019). 본 연구에서도 산림경영활동이 연구대상지 식생구성 변화에 끼치는 영향을 평가하기 위해 모형에 적용한 대상수종을 내음성 수준에 따라 양수 분류군, 중성수 분류군, 음수 분류군으로 분류하고 이들의 지상부생물량을 시계열적으로 분석하였다. 이를 통해 산림경영활동 시나리오의 간벌과 수확별채 시업 시기에 따라 주로 벌채되는 수종 분류군과 그 영향으로 인해 생장이 촉진되는 수종 분류군을 분석하였다.

양수 분류군은 내음성 모수 1과 2에 해당하는 자작나무, 떡갈나무, 굴참나무, 박달나무, 소나무, 일본잎갈나무, 거제수나무로 하였고 중성수 분류군은 내음성 모수 3에 해당하는 느릅나무, 물푸레나무, 신갈나무, 잣나무, 전나무, 층층나무로 하였으며 음수 분류군은 내음성 모수 4와 5에 해당하는 고로쇠나무, 난티나무, 피나무로 하였다(Table 3).

3) 목재생산 변화

산림경영활동의 다양한 시업을 통해 수확되는 목재는 산림생태계에서 얻을 수 있는 직접적인 산물로 수종과 등급에 따라 서로 다른 가치를 지니고 있다. 특히 이 연구의 산림경영활동 시나리오의 수확별채 시업에 의해 산림생태계로부터 수확되는 대경재가 큰 가치를 지니고 있다. 이에 산림경영활동 시나리오의 수확별채 시업을 통해 추출되는 지상부생물량을 통해 매 시업별 평균 수확량과 모의 기간 동안의 수확량을 누적하여 수확별채 시업특성에 따른 목재생산량을 평가하였으며 또한, 수확된 목재생산량을 내음성 수준에 따라 구분하여(Table 3) 생산되는 목재의 구성을 평가하였다.

결과 및 고찰

1. 모형의 검증

가리왕산 모델숲에서 수행된 조사자료를 기반으로 추정된 800 m 이상 지역의 지상부생물량은 183.0 ton/ha으로, 모형을 통해 모의한 초기 지상부생물량인 185.1 ton/ha와 유의미한 차이를 보이지 않았다($p=0.67$; [Figure 3(A)]). 수종별 지상부생물량의 비율은 조사자료와 모의 결과 모두 각각 51%와 65%를 차지한 신갈나무가 최대 우점하는 것으로 나타났다[Figure 3(B)]. 두 번째 우점 수종은 소나무와 잣나무 각각 5%와 2%로 조사자료와 모의 결과가 같았으나, 일본잎갈나무는 조사자료 비율이 1% 인데 반해 모의 결과는 9%로 과대추정되었다. 기타참나무류는 조사자료에서 4% 비율로 나타났고 모의 결과 3%로 비슷한 수준으로 나타났다. 기타 수종의 비율은 조사자료 비율이 36%였으나 모의 결과는 15%로 과소추정되었다.

수종별 지상부생물량의 조사자료 결과와 모의 결과를 비교 결과 0.65의 상관계수(R^2)를 나타냈다[Figure 3(C)]. 주요 우점 수종인 신갈나무, 소나무, 잣나무, 일본잎갈나무는 모의 결과가 조사자료에서 추정된 지상부생물량보다 크게 나타났고 그 외 수종들은 조사자료에서 추정된 지상부생물량이 모의 결과보다 크게 나타났다.

전반적으로 모의 결과의 지상부생물량이 조사결과보다 주요 우점 수종들의 과대추정되는 것으로 나타났다. 이는 LANDIS-II 모형의 특성상 초기 지상부생물량 추정과정에서 외부 교란 요인과 수종간의 경쟁이 반영되지 않기 때문에 발생하는 결과로, 기존의 LANDIS-II 기반 연구에서도 비슷한 결과가 나타나는 것을 볼 수 있다(Scheller and Mladenoff, 2004; Creutzburg et al., 2017; MacLean et al., 2021), 이러한 영향은 특히 교란이 없이 모의되는 초반에 주요 우점 수종인 신갈나무, 소나무, 잣나무, 일본잎갈나무 등의 지상부생물량의 과대추정이 더욱 부각된다는 점을 감안하여 결과해석에 유의해야 한다. 그러나 본 모형에서 활용한 수종별 생리특성 모수는 계방산 일대에서 장기간에 걸쳐 이루어진 장기생태조사자료와 국가산림자원조사에 기반하여 추정된 것으로, 다양한 교란과 수종간 경쟁 등에 의한 고사를 감안한 것이므로 장기간에 걸친 모의에서는 결과가 안정될 것으로 판단된다(Cho et al., 2020; Scheller and Mladenoff, 2004).

2. 총 지상부생물량 변화

산림경영활동 시나리오에 따른 연구대상지의 총 지상부생물량은 벌채면적, 벌채강도, 벌채주기 등에 따라 다양하게 나타났다. 비사업 시나리오에서의 총 지상부생물량은

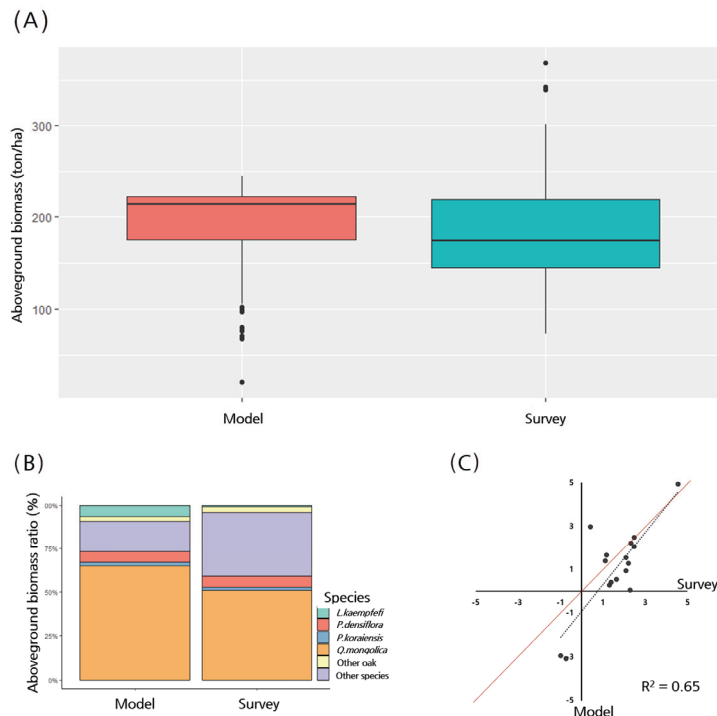


Figure 3. The comparison of initial total aboveground biomass and species aboveground biomass above 800m areas. (A) represents the total aboveground biomass from simulation and survey ($p = 0.67$). (B) represents the ratio of species aboveground biomass in total aboveground biomass. (C) represents the species aboveground biomass comparison in log scale ($R^2 = 0.65$; red line represents 1:1 line).

모의 75년 이후 가장 높았으며 이후 감소하여 150년 후에 가장 낮아졌다가 이후 250~270 ton/ha 수준을 유지하였다 (Figure 4). 이와 같은 총 지상부생물량의 변화는 주요 우점수종인 신갈나무와 소나무가 최대 임령에 이르는 모의 75년까지 성장하면서 증가했다가 그 이후 급격히 고사하면서 감소하고, 이후 내음성이 강한 주요 하층 수종이 성장함에 따라 안정화되는 것으로 판단된다(Ward and Stephens, 1993; Dent et al., 2013).

택벌림, 산벌림, 이단림 산림경영활동 시나리오에서의 총 지상부생물량은 모의 초기 임분개선을 위한 간벌 직후와 수확벌채 직후에 감소하여 모의 75년까지는 비시업 시나리오보다 적었으나, 간벌과 매 수확벌채 시업 직후 매우 빠르게 회복하였다.

택벌림 시나리오는 모의 40년 후부터 140년까지 매 10년마다 수확벌채 시업을 실시하였기 때문에 250 ton/ha 이하 수준에서 총 지상부생물량의 증감이 지속되었다. 산벌림 시나리오의 총 지상부생물량은 15년 주기의 3단계 수확벌채 시업에 따라 모의 75년까지는 250 ton/ha 이하로 유지되었으나, 같은 기간의 택벌림 시나리오보다 높게 유지되었으며, 마지막 수확벌채 시업 이후에는 빠르게 증가하여 모의 100년 이후에는 비시업 시나리오보다도 높은 수준을 유지하였다.

이단림 시나리오의 총 지상부생물량은 모의기간 동안 90% 수준의 강한 강도로 두 차례 수확벌채 시업이 이뤄짐에 따라 벌채 직후 총 지상부생물량이 200 ton/ha 이하로 급격히 낮아졌다가 다시 빠르게 증가하여 모의 110년 시점과 175년 시점에는 모든 시나리오 중 가장 높게 나타났다.

모든 산림경영활동 시나리오에서 수확벌채 시업 이후 총 지상부생물량은 빠르게 회복하였는데, 이는 간벌과 수확벌채 시업에 의해 상층을 차지하던 우점종이 제거됨에

따라 잔존하는 중·하층 식생의 생장이 지속적으로 일어났기 때문이다(Yamamoto, 2000; McCarthy, 2001; Dietze and Clark, 2008). 특히, 이단림 시나리오에서는 개별 수준의 높은 벌채강도로 인해 총 지상부생물량이 크게 감소하였으나 모의 200년 후에는 300 ton/ha 이상으로 매우 높은 지상부생물량을 보였다. 모의 초기에 수확벌채 시업을 실시한 산벌림 시나리오에서는 전체 모의기간 동안 지상부생물량이 300 ton/ha 이하에서 지속된 것으로 볼 때 목표로 하는 시기에 원하는 임분재적을 유도하기 위해 벌채강도, 벌채시기 등을 선정하는 것이 매우 중요할 것으로 판단된다.

3. 내음성에 따른 수종 분류군별 지상부생물량 변화

양수 분류군은 모든 시나리오에서 모의 초기와 비교하였을 때 지상부생물량이 지속적으로 감소하는 것으로 나타났다[Figure 5(A)]. 특히, 모의 140년 동안 비시업 시나리오보다 산림경영활동 시나리오에서 양수 분류군의 지상부생물량 감소가 더 큰 것으로 나타났다. 그러나 모든 산림경영활동 시나리오에서 수확벌채 시업이 종료되는 모의 140년 이후 비시업 시나리오의 지상부생물량보다 더 큰 지상부생물량을 지니는 것으로 나타났다. 특히, 택벌림과 이단림 시나리오에서는 각각 모의 140년, 125년 이후 양수 분류군의 지상부생물량이 증가하는 것으로 나타났다. 반면에 산벌림 시나리오에서는 모의 종료되는 시점에 비시업 시나리오보다 큰 지상부생물량을 지니고 있으나 모의기간 동안 지상부생물량의 지속적인 감소가 일어났다.

중성수 분류군은 비시업 시나리오에서 모의 70년 동안 지상부생물량이 증가하였으나 이후 모의 종료 시점까지 지속적으로 감소하는 것으로 나타났다[Figure 5(B)]. 이는 모의 초기 주요 우점수종인 신갈나무[Figure 5(B)]가 최대

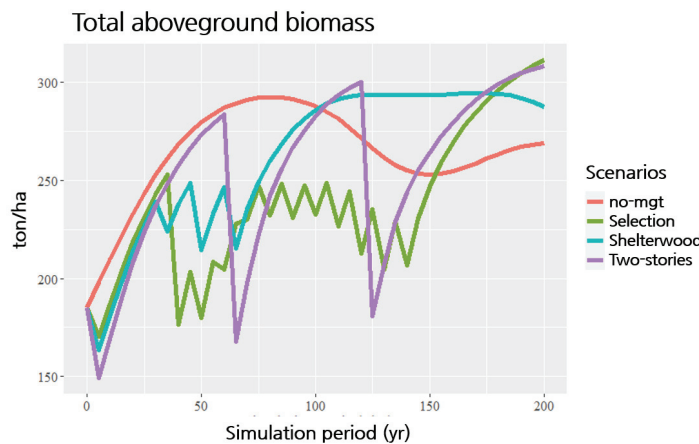


Figure 4. The dynamics of the simulated total aboveground biomass.

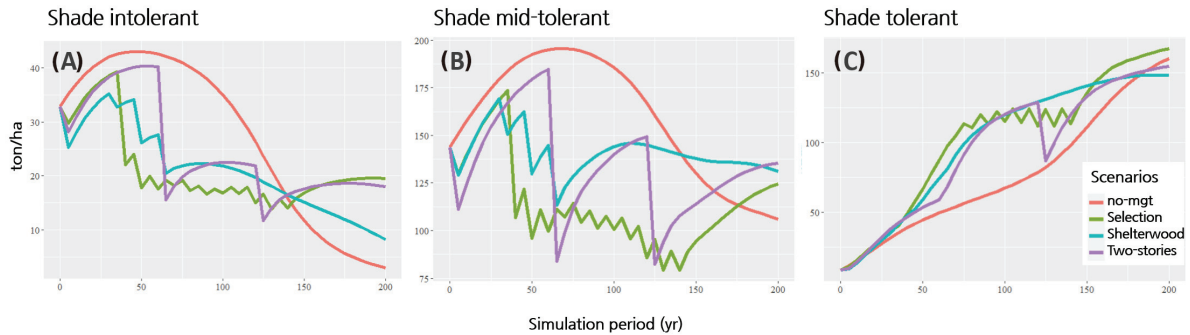


Figure 5. The dynamics of the simulated aboveground biomass of each shade tolerant class.

임령에 가까워짐에 따라 고사가 발생하여 모의 70년 이후부터 중성수 분류군의 지상부생물량을 감소시킨 것으로 나타났다(Scheller and Mladenoff, 2004). 이와 대조적으로 산림경영활동 시나리오에서는 각 산림경영활동 시나리오의 마지막 수확별채 시업 이후 모의 종료시점까지 중성수 분류군의 지상부생물량이 지속적으로 증가되었고, 모의 종료 시점에서는 모든 산림경영활동 시나리오의 지상부생물량이 비시업 시나리오의 지상부생물량보다 크게 추정되었다.

음수 분류군은 모든 시나리오의 모의 종료 시점 지상부생물량이 모의 초기보다 크게 추정되었다[Figure 5(C)]. 특히 산림경영활동 시나리오의 지상부생물량은 모의 초기 간벌 시업 이후 지속적으로 비시업 시나리오보다 크게 추정되었다. 또한 산림경영활동 시나리오의 수확별채 시업에 의한 지상부생물량 감소가 양수 분류군과 중성수 분류군에 비해 크게 일어나지 않았다. 이는 모형의 초기식생형 입력자료에서 음수 분류군이 주로 하층식생에 해당하고, 이 연구의 산림경영활동 시나리오(Figure 2) 특성상 모의 초기 간벌 시업을 제외하고 수확별채 시업 시기에는 상층식생을 중심으로 별채를 진행하기 때문에 발생한 결과로 판단된다. 따라서 음수 분류군은 모의 초기 대부분 상층식생으로 분류한 VI영급 이하로 구성되어 있기 때문에 모의 75년 이전까지는 수확별채 시업에 의한 지상부생물량의 큰 감소가 발생하지 않았다.

내음성 수준에 따른 수종별 분류군 결과를 종합하면, 양수 분류군과 중성수 분류군은 모의 초기 상층의 주요 우점수종인 소나무와 신갈나무가 포함되어 있기 때문에 산림경영활동 시나리오의 수확별채 시업에 의해 상층식생이 별채됨에 따라 지상부생물량의 감소가 크게 발생하는 것으로 나타났다. 반면에 음수 분류군은 모의 초기 수확별채 시업의 별채대상에 포함되는 식생이 적고, 모의 75년 이후부터 별채대상에 포함되는 식생이 늘어나 수확별채 시업에 의한 지상부생물량 감소가 뚜렷하게 나타났다. 또한,

모의기간 동안 산림경영활동 시나리오에 따른 음수 분류군의 지상부생물량 모의 결과는 비시업 시나리오에 비해 큰 지상부생물량을 지니는 점을 미뤄볼 때 모의 초기 간벌과 수확별채에 따른 양수와 중성수 분류군 중심의 상층식생 제거가 하층에 분포한 음수 분류군의 성장을 촉진하는 것을 알 수 있다(Poznanovic et al., 2013). 이와 함께 택벌림, 이단림 산림경영활동 시나리오의 마지막 수확별채 시기인 125년과 140년 이후 양수와 중성수 분류군의 지상부생물량이 증가하는 점을 미뤄볼 때 상층식생 제거가 임분을 신규 식생 정착에 유리하도록 개선한 것을 알 수 있다(Fernandez-Vega et al., 2017; Wang et al., 2011; Zhang et al., 2018). 그러나 산벌림 산림경영활동 시나리오의 마지막 수확별채 시업 시기가 모의 65년 이후로 택벌림과 이단림 산림경영활동 시나리오보다 수확별채 시업기간이 비교적 짧기 때문에 장기간에 걸친 임분개선과 신규 식생 정착을 유도하는데 한계를 지니고 있어 양수 분류군의 지상부생물량은 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 다양한 수종구성을 지닌 임분으로 유도하기 위해서는 다른 선행연구의 결과와 마찬가지로 장기간에 걸친 산림경영활동이 필요할 것으로 판단된다.

4. 목재생산량 변화

본 연구의 목재생산량 평가는 산림경영활동 시나리오의 수확별채 시업에서 상층림에 대한 수확별채량을 기준으로 평가하였다. 택벌림 산림경영활동 시나리오의 모의 40년을 기점으로 100년간 총 545.5 ton/ha를 별채하였으며 10년마다 평균 49.6 ton/ha의 목재를 생산하였다(Table 4). 모의기간 동안 중성수 분류군의 목재생산량은 총 321.4 ton/ha로 가장 많은 양을 차지하였고 음수 분류군이 161.8 ton/ha, 양수 분류군이 62.4 ton/ha로 나타났다. 그러나 택벌림 산림경영활동 시나리오에서 목재생산량의 가장 큰 비율을 차지하는 중성수 분류군의 목재생산량은 모의기간 동안 지속적으로 감소하였으며, 음수 분류군의 목재생

Table 4. Biomass harvested by forest management in Selection scenario.

Simulation year	Biomass harvested (ton/ha)	
	Mean	Standard error
5	32.20	-
40	107.22	0.002
50	56.19	0.002
60	33.70	0.002
70	20.42	0.001
80	36.77	0.01
90	39.51	0.01
100	35.56	0.01
110	45.82	0.01
120	58.79	0.02
130	60.48	0.01
140	51.55	0.01

산량은 증가하는 것으로 나타났다. 특히 매 수확벌채 시업의 내음성 수준에 의한 목재생산량은 모의 90년 이후 음수 분류군이 중성수 분류군보다 큰 비율을 차지하는 것으로 나타났다.

산별림 산림경영활동 시나리오는 모의 35년 시점에 실시한 1차 수확벌채 시업에서 32.6 ton/ha, 2차 수확벌채 시업에서 54.8 ton/ha, 3차 수확벌채 시업에서 54.2 ton/ha를 벌채하여 총 141.6 ton/ha의 목재를 생산하였다(Table 5). 모의기간 동안 3차례의 수확벌채 시업 중 중성수 분류군의 목재생산량이 113.9 ton/ha로 가장 많은 것으로 나타났다. 다음으로 양수 분류군 기반의 목재생산량이 21.5 ton/ha로 나타났고 음수 분류군 기반의 목재생산량은 6.2 ton/ha로 나타났다. 3차례에 걸친 수확벌채 시업 동안 양수와 중성수 분류군은 2차 수확벌채 시업 시기까지 목재생산량이 증가하였으나 3차 수확벌채 시업 시기의 목재생산량은 2차 시기보다 소폭 감소하였다. 반면에 음수 분류군 기반의 목재생산량은 총 목재생산량에서 큰 비율을 차지하지 않지만 3차례 수확벌채 시업마다 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다.

이단림 산림경영활동 시나리오는 모의 65년 시점에 실시한 1차 수확벌채 시업에서 149.9 ton/ha를 벌채하였고 모의 125년 시점에 실시한 2차 수확벌채 시업에서 150 ton/ha를 벌채하여 총 299.9 ton/ha의 목재를 생산하였다(Table 6). 모의기간 동안 중성수 분류군의 목재생산량은 199 ton/ha로 가장 많은 것으로 나타났다. 다음으로 음수 분류군이 59.8 ton/ha로 나타났고 양수 분류군이 41 ton/ha로 나타났다. 2차례에 걸친 수확벌채 시업에서 양수와 중

Table 5. Biomass harvested by forest management in Shelterwood scenario.

Simulation year	Biomass harvested (ton/ha)	
	Mean	Standard error
5	39.56	-
35	39.53	-
50	54.91	0.002
65	54.22	0.003

Table 6. Biomass harvested by forest management in Two-stories scenario.

Simulation year	Biomass harvested	
	Mean	Standard error
5	57.55	-
65	150.26	0.01
125	149.96	0.02

성수 분류군의 목재생산량은 1차 시기(모의 65년)가 2차 시기(모의 125년)보다 더 큰 것으로 나타났다. 반면에 음수 분류군의 목재생산량은 1차 시기(3.5 ton/ha)보다 2차 시기(56.4 ton/ha)에 증가하는 것으로 나타났다.

종합하면, 산림경영활동 시나리오의 수확벌채 시업에 따른 목재생산의 총량은 벌채주기와 벌채강도가 클수록 많은 것으로 나타났다. 특히 본 연구에서는 택별림 산림경영활동 시나리오는 매 10년마다 수확벌채 시업을 실시하였기 때문에 산별림과 이단림 산림경영활동 시나리오보다 벌채주기가 매우 짧아 목재수확량이 가장 많은 것으로 평가되었다(Figure 2). 그러나 10년 주기의 수확벌채 시업으로 인해 시업 이후 중·하층 잔존목이 벌채대상 임령에 도달하는데 시간이 부족하여 수확벌채 시업 시기에 따라 20.4 ton/ha에서 60.5 ton/ha의 사이의 목재생산량 지니는 것으로 나타났다. 이에 시업시기에 따라 목재생산량이 최대 3배까지 차이가 나는 것으로 나타났다(Table 4). 또한, 수확벌채 시업 초기에는 상층림의 구성이 양수와 중성수 분류군을 중심으로 구성되어있기 때문에 목재생산량의 구성이 주로 양수와 중성수 분류군으로 나타났으나 모의 80년을 기점으로 목재생산량에서 음수 분류군의 비율이 양수 분류군보다 큰 것으로 나타났으며 마지막 수확벌채 시업 시기에는 음수 분류군의 비율이 중성수 분류군 비율보다 큰 것으로 평가되었다.

산별림 산림경영활동 시나리오는 모의 65년이내에 모든 수확벌채 시업이 종료되고 벌채강도가 수확벌채 시업 시기에 따라 20%, 35%, 45%로 구성되어 있기 때문에 목재생산량이 택별림과 이단림 산림경영활동 시나리오보다

매우 적은 것으로 나타났다. 특히 모의 65년 동안 하층에 주로 분포하는 음수 분류군은 벌채대상 임령에 일부만 포함되기 때문에 모의기간 동안 총 6.2 ton/ha만 목재로 생산되었다. 이에 따라 산벌림 산림경영활동 시나리오와 같이 비교적 짧은 벌채기간과 20~45% 수준의 벌채강도에서는 택벌림과 이단림 산림경영활동 시나리오보다 양수와 중성수, 음수 분류군의 목재생산량이 균일할 수 있는 특징이 있다.

이단림 산림경영활동 시나리오는 수확벌채 시업에 있어 60년의 벌채주기와 90% 수준의 매우 큰 벌채강도를 지니고 있다(Figure 2). 이에 따라 수확벌채 시업 사이에 60년이라는 임분의 성장시간을 부여할 수 있어 수확벌채 시업 직전 다른 산림경영활동 시나리오보다 큰 지상부생물량을 지니고(Figure 4), 이에 따라 매 수확벌채 시업 시 150 ton/ha의 매우 크고 균일한 목재생산량을 지니는 것으로 나타났다. 그러나 1차 수확벌채 시업의 목재생산량은 양수와 중성수 분류군 중심으로 구성되어 있지만, 2차 수확벌채 시업의 목재생산량은 1차 수확벌채 시업 이후 잔존한 하층의 중성수와 음수 분류군의 성장량으로 구성되어 있어 두 시기 사이에 목재생산량의 구성이 매우 상이한 것으로 나타났다(Figure 5; Table 6).

따라서, 산림경영활동 목표기간에서 최대 목재생산량을 확보하기 위해서는 짧은 벌채주기와 높은 벌채강도를 지닌 택벌림 산림경영활동 시나리오가 적합할 것으로 보인다. 그러나 균일한 양의 목재생산을 위해서는 이단림과 산벌림 산림경영활동 시나리오가 적합할 것으로 판단된다. 또한 목재구성을 균일하게 유지하기 위해서는 산벌림 산림경영활동 시나리오가 적합할 것으로 보인다.

결론

우리나라의 산림은 녹화정책은 세계적으로 유례없는 국토녹화 성공사례이다. 특히, 1970년대부터 진행된 조림 정책과 보호 정책을 바탕으로 막대한 임목축적을 지니게 되었고, 오늘날 다양한 생태계서비스를 제공하고 있다. 그러나 지속적인 조림과 보호 정책의 패러다임 속에서 산림의 취약성을 높이는 수목의 노령화와 외부적 요인으로부터 산림을 보존하기 위한 산림경영활동의 연구는 미비한 실정이다. 이에 본 연구에서는 식생의 성장과 경쟁, 산림경영활동을 고려할 수 있는 산림경관모형 LANDIS-II를 활용하여 가리왕산 모델숲을 대상으로 산림경영활동 시나리오에 따른 산림경관의 총 지상부생물량, 내음성 수준에 따른 지상부생물량, 목재생산량 변화에 대해 평가하였다.

본 연구에서 적용한 산림경영활동 시나리오는 과거 가

리왕산 모델숲에서 실시한 택벌림, 산벌림, 이단림 조성을 중심으로 향후 목재생산량까지 고려하였으며 시나리오별 벌채면적, 벌채량, 벌채시기 등의 차이를 지니고 있다. 산림경영활동 시나리오의 모의 결과 총 지상부생물량은 간벌과 수확벌채 시 크게 감소하는 것으로 나타났으나 택벌림 시나리오는 10년, 산벌림 시나리오는 15년, 이단림 시나리오는 50년 후 이전 수준 이상의 총 지상부생물량으로 회복하고 이후에는 더 큰 총 지상부생물량을 지니는 것으로 평가되었다. 이에 따라 각 시나리오가 지닌 벌채주기에 따라 수확벌채 시 이전 시점보다 큰 지상부생물량을 지닐 것으로 판단되며 수확벌채가 모두 종료된 후 지상부생물량이 회복함에 따라 모의기간이 종료되는 시점에는 모든 산림경영활동 시나리오가 비시업 시나리오보다 더 큰 총 지상부생물량을 지니는 것을 확인하였다.

수종별 내음성 수준에 따른 지상부생물량의 변화는 양수와 중성수, 음수 분류군에 따라 차이를 보였다. 본 연구의 모의 초기 식생구성은 가리왕산의 실제 식생구성을 반영하였으며, 그 결과 상층림에는 주로 양수와 중성수 분류군으로 구성되었고, 중·하층림은 주로 중성수와 음수 분류군으로 구성되도록 하였다. 모의 결과, 우리나라의 주요 우점수종인 소나무와 신갈나무가 포함된 양수와 중성수 분류군은 시업 및 비시업 시나리오에서 모두 쇠퇴하는 것으로 나타났다. 그러나 산림경영활동 시나리오에서는 간벌 및 수확벌채 시업이 실시됨에 따라 양수와 중성수 분류군의 지상부생물량 감소가 비시업 시나리오보다 크게 나타났으며, 이는 산림경영활동으로 인해 양수와 중성수의 성장 및 갱신조건이 조성되었기 때문에 나타난 결과로 판단된다. 이에 따라 식생의 천이과정에서 쇠퇴하는 양수와 중성수 분류군의 보존을 위해서는 지속적인 산림경영활동이 효과적일 것으로 판단된다.

산림경영활동에 따른 목재생산량은 벌채강도와 벌채주기에 따라 차이를 보였다. 산림경영활동에 의해 상층림의 목재생산이 지속되고 중·하층의 잔존 수목이 성장함에 따라 생산되는 목재의 수종구성이 변하는 것으로 나타났다. 따라서 산림경영활동의 목표를 달성하기 위해서는 다양한 시업이 산림식생의 성장과 경쟁에 끼치는 영향을 복합적으로 고려할 필요가 있으며, 본 연구에서 제시한 모형뿐만 아니라 다양한 모형적 접근을 통한 복합적인 평가가 필요할 것으로 판단된다. 이를 통해 본 연구를 포함한 확장된 모형적 접근법을 개발한다면 모형을 이용하여 산림경영활동에 따른 산림경관 변화 평가와 산림생태계 가치 평가 등을 실시함으로써 적합한 산림경영활동을 선정하기 위한 의사결정 도구로 발전시킬 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 “산림생태계서비스 정보 활용체계 구축 및 산림관리 효과성 평가기법 개발(과제번호: FE0100-2021-01)” 연구와 산림청(한국임업진흥원) 산림과학기술 연구개발사업(2019150B10-2323-0301)의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

References

- Aber, J.D., Ollinger, S.V., Federer, C.A., Reich, P.B., Goulden, M.L., Kicklighter, D.W., Melillo, J. M. and Lathrop Jr., R.G., 1995. Predictiong the effects of climate change on water yield and forest production in the northeastern United States. *Climate Research* 5(3): 207-222.
- Baker, W.L., 1995. Longterm response of disturbance landscapes to human intervention and global change. *Landscape Ecology* 10(3): 143-159.
- Barros, A.M. et al. 2017. Spatiotemporal dynamics of simulated wildfire, forest management, and forest succession in central Oregon, USA. *Ecology and Society* 22(1).
- Blumstein, M. and Thompson, J.R. 2015. Land-use impacts on the quantity and configuration of ecosystem service provisioning in Massachusetts, USA. *Journal of Applied Ecology* 52(4): 1009-1019.
- Bruijn, A.D., Gustafson, E.J., Sturtevant, B.R., Foster, J.R., Miranda, B.R., Lichti, N.I. and Jacobs, D.F. 2014. Toward more robust projections of forest landscape dynamics under novel environmental conditions: embedding PnET within LANDIS-II. *Ecological Modelling* 287: 44-57.
- Bu, R., He, H.S., Hu, Y., Chang, Y. and Larsen, D.R. 2008. Using the LANDIS model to evaluate forest harvesting and planting strategies under possible warming climates in Northeastern China. *Forest Ecology and Management* 254(3): 407-419.
- Byun, J.G. et al. 2013. The flora of vascular plants in Mt. Gariwang protected area for forest genetic resource conservation, South Korea. *Korean Journal of Plant Resources* 26(5): 566-588.
- Cho, W. 2018. Modeling of forest landscape response to climate change: a case study of Mt. Gyeongbongsan. Kookmin University. Seoul. pp. 1-105. (Master's thesis; in Korean with English abstract)
- Cho, W., Lim, W., Kim, E.S., Lim, J.H. and Ko, D.W. 2020. Parameterization and application of a forest landscape model by using national forest inventory and long term ecological research data. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 22(3): 215-231. (in Korean with English abstract)
- Choi, H.K., Park, B.B., Sung, J.H. and Shin, M.Y. 2013. Comparison of competition indices by silvicultural systems before and after treatments for natural deciduous forests in Pyeongchang. *Journal of Korean Society of Forest Science* 102(4): 515-521. (in Korean with English abstract)
- Creutzburg, M.K., Scheller, R.M., Lucash, M.S., LeDuc, S.D. and Johnson, M.G. 2017. Forest management scenarios in a changing climate: trade-offs between carbon, timber, and old forest. *Ecological Applications* 27(2): 503-518.
- Dent, D.H., DeWalt, S.J. and Denslow, J.S. 2013. Secondary forests of central Panama increase in similarity to old-growth forest over time in shade tolerance but not species composition. *Journal of Vegetation Science* 24(3): 530-542.
- Dietze, M.C. and Clark, J.S. 2008. Changing the gap dynamics paradigm: vegetative regeneration control on forest response to disturbance. *Ecological Monographs* 78(3): 331-347.
- Dorbe, M., Long, J.W. Maxwell, C., Elliot, W.J., Lew, R., Brooks, E.S. and Scheller, R.M. 2022. Water quality and forest restoration in the Lake Tahoe basin: impacts of future management options. *Ecology and Society* 27(2): 447-457.
- Feng, G., Svenning, J.C., Mi, X., Jia, Q., Rao, M., Ren, H., Bebbler, D. P. and Ma, K. 2014. Anthropogenic disturbance shapes phylogenetic and functional tree community structure in a subtropical forest. *Forest Ecology and Management* 313: 188-198.
- Fernandez-Vega, J., Covey, K.R. and Ashton, M.S. 2017. Tamm review: large-scale infrequent disturbances and their role in regenerating shade-intolerant tree species in Mesoamerican rainforests: implications for sustainable forest management. *Forest Ecology and Management* 395: 48-68.
- Fraser, J.S., He, H.S., Shifley, S.R., Wang, W.J. and Thompson III, F.R. 2013. Simulating stand-level harvest prescriptions across landscapes: LANDIS PRO harvest module design. *Canadian Journal of Forest Research* 43(10): 972-978.
- Gustafson, E.J., Shifley, S.R., Mladenoff, D.J., Nimerfro, K.K. and He, H.S. 2000. Spatial simulation of forest succession and timber harvesting using LANDIS. *Canadian Journal of Forest Research* 30(1): 32-43.
- Gustafson, E.J., Shvidenko, A.Z., Sturtevant, B.R. and Scheller, R.M. 2010. Predicting global change effects on forest biomass and composition in south-central Siberia.

- Ecological Applications 20(3): 700-715.
- Haga, C. et al. 2018. Simulation of natural capital and ecosystem services in a watershed in Northern Japan focusing on the future underuse of nature: by linking forest landscape model and social scenarios. *Sustainability Science* 14(1): 89-106.
- Haq, S.M., Rashid, I., Khuroo, A.A., Malik, Z.A. and Malik, A.H. 2019. Anthropogenic disturbances alter community structure in the forests of Kashmir Himalaya. *Tropical Ecology* 60(1): 6-15.
- He, H.S. and Mladenoff, D.J. 1999. The effects of seed dispersal on the simulation of long-term forest landscape change. *Ecosystems* 2(4): 308-319.
- Kim, Y.J., Sung, J.H., Yang, H.M. and Shin, M.Y. 2012. Changes in stand structures before and after silvicultural treatments in natural deciduous forests of Pyungchang area. *Journal of Korean Society of Forest Science* 101(2): 297-304. (in Korean with English abstract)
- Kline, J.D. et al. 2016. Evaluating carbon storage, timber harvest, and habitat possibilities for a Western Cascades (USA) forest landscape. *Ecological Applications* 26(7): 2044-2059.
- Korea Forest Service. 2018. Basic forest policies. Korea Forest Service. (in Korean)
- Korea Forest Service. 2020. Statistical yearbook of forestry. Korea Forest Service. (in Korean)
- Korea Rural Economic Institute. 2013. A study on long-term forest management strategies (Year 2 of 2). Korea Rural Economic Institute. pp. 1-135. (in Korean with English abstract)
- Korea Rural Economic Institute. 2014. Development Plan for Community Based Forest Management in Korea. Korea Rural Economic Institute. pp. 1-126. (in Korean with English abstract)
- Korea Rural Economic Institute. 2019. Pilot research on how to achieve circular economy for forest resources with a focus on forest management. Korea Rural Economic Institute. pp. 1-173. (in Korean with English abstract)
- Lee, K.S. and Kim, J.H., 1994. Primary succession on talus area at Mt. Kariwangsan, Korea. *The Korean Journal of Ecology* 17(2): 120-130. (in Korean with English abstract)
- MacLean, M.G., Duveneck, M.J., Plisinski, J., Morreale, L.L., Laflower, D. and Thompson, J.R. 2021. Forest carbon trajectories: consequences of alternative land-use scenarios in New England. *Global Environmental Change* 69: 102310.
- Maxwell, C., Scheller, R.M., Long, J.W. and Manley, P. 2022. Forest management under uncertainty: the influence of management versus climate change and wildfire in the lake Tahoe Basin, USA. *Ecology and Society* 27(2): 15.
- McCarthy, J. 2001. Gap dynamics of forest trees: a review with particular attention to boreal forests. *Environmental Reviews* 9(1): 1-59.
- McDowell, N.G., Tan, Z., Hurteau, M.D. and Prasad, R. 2021. Trade-offs of forest management scenarios on forest carbon exchange and threatened and endangered species habitat. *Ecosphere* 12(10): e03779.
- Mina, M., Messier, C., Duveneck, M., Fortin, M.J. and Aquilué, N. 2021. Network analysis can guide resilience-based management in forest landscapes under global change. *Ecological Applications* 31(1): e2221.
- National Institute of Forest Science. 2010. The prediction of wood production in South Korea. National Institute of Forest Science 10-04. pp.1-136. (in Korean)
- National Institute of Forest Science. 2013. Development of digital climate map of Korean forest and prediction of forest climate. National Institute of Forest Science. 13-19. pp. 1-133. (in Korean)
- National Institute of Forest Science. 2018. The past and future research of forest ecology in Mt.Gariwang. National Institute of Forest Science. 103. pp.1-24. (in Korean)
- National Institute of Forest Science, 2019. The standard carbon absorption of major tree species in forest (ver. 1.2). National Institute of Forest Science. 129. pp.1-23. (in Korean)
- Park, Y.S., Park, Y.K. and Yang, H.M. 2016. Effects of clear-cutting on forest arthropod communities at two different vertical levels (crown and ground surface). *Korean Journal of Ecology and Environment* 49(4): 271-278. (in Korean with English abstract)
- Poznanovic, S.K., Webster, C.R. and Bump, J.K. 2013. Maintaining mid-tolerant tree species with uneven-aged forest management: 9-year results from a novel group-selection experiment. *Forestry* 86(5): 555-567.
- Scheller, R.M. and Mladenoff, D.J., 2004. A forest growth and biomass module for a landscape simulation model, LANDIS: design, validation, and application. *Ecological Modelling* 180(1): 211-229.
- Scheller, R.M., Domingo, J.B., Sturtevant, B.R., Williams, J.S., Rudy, A., Gustafson, E.J. and Mladenoff, D.J. 2007. Design, development, and application of LANDIS-II, a spatial landscape simulation model with flexible temporal and spatial resolution. *Ecological Modelling* 201(3-4): 409-419.
- Sung, J.H., Lee, Y.G., Park, K.E. and Shin, M.Y. 2014. Assessment of stand diversity change by different

- silvicultural treatments for natural deciduous forests in Mt. Gariwang. *Journal of Korean Society of Forest Science* 103(4): 613-621. (in Korean with English abstract)
- Taylor, A.R., Hart, T. and Chen, H.Y. 2013. Tree community structural development in young boreal forests: a comparison of fire and harvesting disturbance. *Forest Ecology and Management* 310: 19-26.
- 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.
- Wang, G. and Liu, F. 2011. The influence of gap creation on the regeneration of *Pinus tabuliformis* planted forest and its role in the near-natural cultivation strategy for planted forest management. *Forest Ecology and Management* 262(3): 413-423.
- Ward, J.S. and Stephens, G.R. 1993. Influence of crown class and shade tolerance on individual tree development during deciduous forest succession in Connecticut, USA. *Forest Ecology and Management* 60(3-4): 207-236.
- Xi, W. and Xu, C. 2010. PnET-for-LANDIS-II User guide v1.0.
- Yamamoto, S.I. 2000. Forest gap dynamics and tree regeneration. *Journal of Forest Research* 5(4): 223-229.
- Zhang, T., Yan, Q., Wang, J. and Zhu, J. (2018). Restoring temperate secondary forests by promoting sprout regeneration: effects of gap size and within-gap position on the photosynthesis and growth of stump sprouts with contrasting shade tolerance. *Forest Ecology and Management* 429: 267-277.

Manuscript Received : September 30, 2022

First Revision : December 11, 2022

Second Revision : March 23, 2023

Accepted : April 12, 2023