

국유림의 경제적·공익적 기능을 고려한 적정 목재생산량 추정

정유진¹ · 김영환² · 장윤성² · 광두안³ · 박기현¹ · 김다영¹ · 정형식¹ · 한 희^{1,4*}

¹서울대학교 농림생물자원학부, ²국립산림과학원 산림정책연구과,
³순천대학교 산림자원·조경학부, ⁴서울대학교 농업생명과학연구원

Estimating Optimal Timber Production for the Economic and Public Functions of the National Forests in South Korea

Yujin Jeong¹, Younghwan Kim², Yoonseong Chang², Dooahn Kwak³, Gihyun Park¹,
Dayoung Kim¹, Hyungsik Jeong¹ and Hee Han^{1,4*}

¹Department of Agriculture, Forestry and Bioresources, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

²Division of Forest Policy and Economics, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea

³Department of Forest Resources, Sunchon National University, Sunchon 57922, Korea

⁴Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

요약: 국유림은 사유림에 비해 높은 수준의 자본과 기술, 노동력을 투입할 수 있고 상대적으로 집약적인 관리가 가능하다. 따라서 국유림은 장기적인 목재 수요에 대비한 산림자원의 비축기지로서의 역할뿐만 아니라, 사회가 필요로 하는 산림의 다양한 기능을 안정적으로 발휘할 수 있어야 한다. 하지만 현재 국유림은 4영급 이상인 임분이 대부분으로, 영급이 불균형한 상태에서 목재수확기에 도달하고 있다. 따라서 체계적인 경영계획에 의한 목재수확이 이루어지지 않으면 국유림의 다양한 기능의 지속성을 보장하기 어렵다. 본 연구는 국유림의 영급구조를 개선하면서도 경제적·공익적 기능을 지속가능하게 유지하기 위한 국유림의 적정 목재생산량을 추정하는 것을 목표로 하였다. 이를 위해 먼저 국유림 내에서 목재생산에 적합한 지역을 분석하고, 다목적 선형계획법을 적용하여 경제적 기능과 공익적 기능을 동시에 고려할 수 있는 산림경영계획모델을 개발하였다. 분석 결과, 국유림 내 목재생산 적합 지역의 면적은 약 488천ha로, 이를 중심으로 목재수확을 적절하게 관리하면 영급분포가 개선되고 공익적 기능도 지속가능하게 유지되는 것으로 나타났다. 향후 100년 동안 국유림에서 생산 가능한 목재량은 연평균 약 200만m³으로, 이는 연간 국산목재 공급량의 44% 수준을 차지하는 것으로 나타났다.

Abstract: National forests have an advantage over private forests in terms of higher investment in capital, technology, and labor, allowing for more intensive management. As such, national forests are expected to serve not only as a strategic reserve of forest resources to address the long-term demand for timber but also to stably perform various essential forest functions demanded by society. However, most forest stands in the current national forests belong to the fourth age class or above, indicating an imminent timber harvesting period amid an imbalanced age class structure. Therefore, if timber harvesting is not conducted based on systematic management planning, it will become difficult to ensure the continuity of the national forests' diverse functions. This study was conducted to determine the optimal volume of timber production in the national forests to improve the age-class structure while sustainably maintaining their economic and public functions. To achieve this, the study first identified areas within the national forests suitable for timber production. Subsequently, a forest management planning model was developed using multi-objective linear programming, taking into account both the national forests' economic role and their public benefits. The findings suggest that approximately 488,000 hectares within the national forests are suitable for timber production. By focusing on management of these areas, it is possible to not only improve the age-class distribution but also to sustainably uphold the forests' public benefits. Furthermore, the potential volume of timber production from the national forests for the next 100 years would be around 2 million m³ per year, constituting about 44% of the annual domestic timber supply.

Key words: national forest, timber production potential, public functions of forests, age-class structure, multi-objective linear programming

* Corresponding author
E-mail: hee.han@snu.ac.kr

ORCID
Hee Han  <https://orcid.org/0000-0002-2588-7176>

서론

국유림은 장기적인 목재 수요에 대비한 산림자원의 비축기지이자 사회가 요구하는 산림의 다양한 기능을 국가가 국민에게 안정적으로 제공하기 위한 필수 공간이다. 2020년 기준 우리나라 국유림의 면적은 1,653천ha로 전체 산림의 약 26%를 차지하며, ha당 임목축적은 182m³으로 전국 평균인 165m³을 상회한다(KFS, 2022a).

국유림은 1970년대 치산녹화 사업의 성공과 집약적인 관리로 풍부한 산림자원을 보유하고 있어 산림의 기능 발휘를 위한 기반을 갖춘 상태이다. 하지만 국유림은 다른 일반 산림과 마찬가지로 많은 면적이 4영급 이상에 속해 있어 영급구조가 불균형하다(Figure 1). 이와 같은 영급 불균형은 지속적인 목재생산을 저해할 뿐 아니라, 탄소를 흡수할 수 있는 능력과 생물다양성 유지 등 산림의 다양한 기능을 저하시킨다. 사회의 지속성 측면에서 국내 산림면적의 1/4 이상을 차지하는 국유림이 일정 수준의 재화와 서비스를 제공하는 것은 매우 중요하다. 그러나 현재의 불균형한 영급 구조를 전환하지 않으면 기대하는 국유림의 기능은 영속적으로 발휘되기 어렵다.

국유림에 요구되는 지속가능한 산림경영을 실현하기 위해서는 체계적인 경영계획의 수립이 필요하다. 이를 위해서는 먼저 현재 국유림 내 분포하고 있는 산림자원이 정확하게 파악되어야 한다. 이용 가능한 산림자원이 어디에, 얼마나 분포하고 있는가를 파악하는 것은 산림정책 수립의 기초가 된다. 산림자원의 추정과 관련하여 국내에서는 Won et al.(2011)과 Kim et al.(2020)이 경사와 입도로부터의 거리 등 목재수확의 제약조건을 고려하여 전국 산림에서 공급 가능한 목재 잠재량을 추정한 바 있다. 또한 Son et al.(2007)은 임상별 바이오매스 확장계수(biomass expansion factor)를 이용하여 산림 시업지의 바이오매스 자원의 공간분포를 제공하는 프로그램을 개발하였다. 한편, Lee et al.(2012)은 HyTAG(Hydrology and Thermal Analogy Group) 모델을 이용하여 기후변화에 따른 수종의 최적분

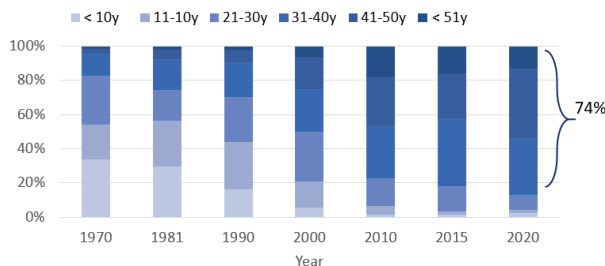


Figure 1. Changes in age-class distribution of national forests (KFS, 2022a).

포범위를 예측하고 수종별 재적량을 추정하였다.

국외의 경우 국가단위나 지역단위에서 산림자원의 양을 추정하는 연구들이 진행되어 왔다. 이러한 사례로 Reese et al.(2003)은 스웨덴의 전체 산림을 대상으로 Landsat TM 과 SPOT HRV 위성 영상과 국가산림자원조사로부터 취득한 현장 자료를 이용하여 임목축적과 임령을 추정하는 연구를 수행하였고, Verkerk et al.(2019)은 유럽 지역 내 잠재적으로 이용 가능한 산림바이오매스의 분포를 European Forest Infomation SCENario (EFISCEN) 모델을 이용하여 추정한 바 있다. 또한 Viana et al.(2010)은 포르투갈의 열병합 발전에 이용 가능한 산림바이오매스량을 추정하는 연구를 수행하였는데, 특히 수종별 바이오매스 상대생장식을 이용하여 산림부산물(logging residues)의 지리적 분포와 양을 예측하고 이에 따른 발전소의 최적 후보지를 제시하였다.

한편, 국유림의 불균형한 영급구조를 전환하기 위해서는 산림의 현재 상태와 미래의 목표를 고려한 목재수확계획의 수립이 요구된다. 산림분야에서는 오래전부터 다양한 수리계획기법(mathematical programming)을 적용하여 이러한 문제들을 다뤄왔다. 그 대표적인 사례로 국내에서는 임목수확량 조절에 선형계획법(linear programming)을 적용한 Kwon and Chang(1988), Woo(1991), Kim et al.(2020) 등의 연구나 목표계획법(goal programming)을 적용한 Chang and Seok (1995), Won et al.(2010)의 연구, 다목적 선형계획법(Multi-Objective Linear Programming, MOLP)을 적용한 Park and Chung(1999, 2000)의 연구들이 있다. 특히 MOLP는 최근 산림의 생태적·공익적 기능에 대한 사회적 요구가 높아짐에 따라 그 활용성이 더욱 높아지고 있는데, Kim et al.(2021, 2022)은 MOLP를 적용하여 홍천 가리산선도산림경영단지의 목재생산과 탄소저장, 수원함양의 기능을 동시에 고려하는 다목적 산림경영계획 모델을 개발한 바 있다.

본 연구는 이와 같은 국내·외 선행연구들을 참고하여 국유림의 불균형한 영급분포 문제를 해결하면서도 경제적·공익적 기능을 지속가능하게 유지하기 위한 국유림의 적정 목재생산량을 추정해 보고자 하였다. 이를 위해 국유림 내에서 목재생산에 적합한 지역을 분석하고, 다목적 선형기법을 적용하여 경제적 기능과 공익적 기능을 동시에 고려할 수 있는 산림경영계획모델을 개발하였다.

연구내용 및 방법

1. 연구대상지

국유림은 「국유림의 경영 및 관리에 관한 법률」에 따라

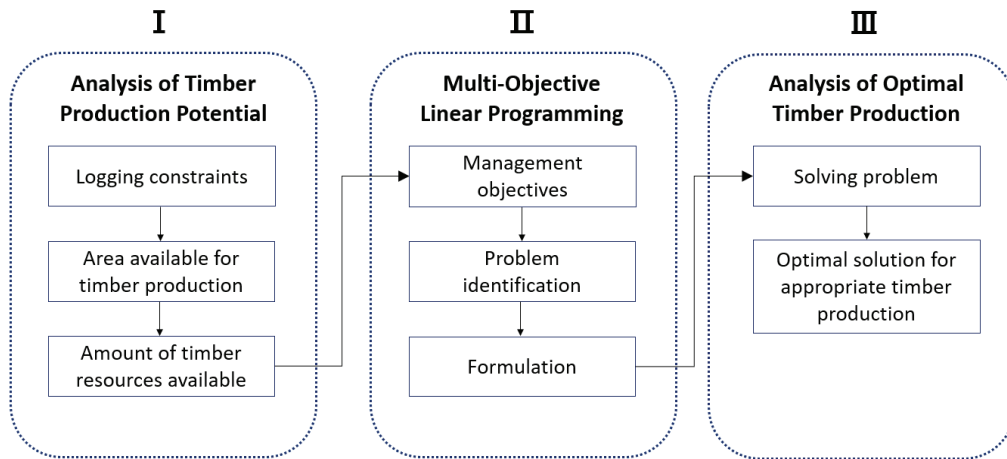


Figure 2. Framework of the study.

목재를 비롯한 임산물의 안정적 공급과 산림의 공익기능 증진을 위해 육성되는 곳으로, 국민의 삶의 질 향상과 공·사유림 경영의 선도적 역할을 수행하는 기본원칙에 따라 경영된다. 본 연구는 국유림의 기본적인 역할인 목재 생산의 비축기지 및 공익기능의 제공 측면에서 그 잠재력을 살펴보기 위하여 분석의 대상을 전체 국유림 1,652천ha으로 설정하였다. 또한 각 5개 지방청별 관리방향을 경영 계획에서 적용하는 사업 체계 등에 반영하기 위하여 전체 국유림을 5개의 지방청 관할구역으로 구분하고, 지방청별로 수립된 「지역산림계획」과 수종 및 산림기능의 분포를 함께 고려하였다.

2. 분석체계

본 연구는 국유림의 목재생산 잠재량을 분석하는 단계와 다목적 산림경영모델을 구축하는 단계, 그리고 두 과정을 토대로 향후 국유림의 적정 목재생산량을 추정하는 단계로 구분되어 추진되었다(Figure 2).

첫 번째 목재생산 잠재량 분석 단계에서는 먼저 전국단위 산림공간정보 DB를 구축하여 우리나라 전체 산림의 목재생산 가능 지역을 분석하였다. 이 때 소유구분에 대한 정보를 융합하여 국유림의 공간을 추출하고 경사와 임도로부터의 거리 등의 제약조건을 적용하여 목재생산 가능 지역을 선별하였다. 다음으로 국유림의 경제적·공익적 기능을 모두 고려한 다목적 산림경영계획모델을 개발하기 위하여 국유림의 경영문제를 파악하고 해당 문제를 정량적으로 분석할 수 있는 MOLP 수식모형을 작성하였다. 마지막으로 국유림의 목재생산 가능 지역을 대상으로 작성된 모형을 적용하여 100년의 장기적 시간범위를 고려한 적정 목재생산량을 추정하였다.

3. 목재생산 잠재량 추정

목재생산 잠재량은 목재생산과 관련된 다양한 여건을 고려하였을 때 현실적으로 생산 가능한 목재 자원량을 의미한다(Won et al., 2010). 산림경영계획을 수립하거나 목재 공급량을 예측하는 등 목재 자원의 이용적 측면을 고려하기 위해서는 전체 목재 자원량이 아닌 잠재적으로 생산 가능한 목재 자원량에 대한 분석이 요구된다.

따라서 국유림의 적정 목재생산량을 예측하기 위해서는 먼저 현재 국유림의 목재생산 잠재량을 추정할 필요가 있다. 본 연구에서는 법적·지형적·기술적 제약조건을 고려하여 전체 산림 중 목재생산이 가능한 지역을 공간상에서 파악하고, 이를 기반으로 목재생산 잠재량을 추정하였다. 이를 위해 임상도, 산지구분도, 하천망도, 수치표고모델, 도로망도, 임도망도를 하나의 공간자료로 융합했으며, 토지소유구분도를 추가하여 소유별로 목재생산 가능 지역을 구분할 수 있도록 하였다.

법적으로 산림에서 목재수확이 어려운 지역은 「산지관리법」상 공익용 산지와 「지속가능한 산림자원 관리지침」의 별채금지구역을 참조하였다. 공익용 산지에는 산림유전 자원보호구역, 백두대간보호구역 등이 포함되며, 일부 공익용산지에서는 허가·신고제도로 별채가 가능하다. 하지만 대부분 타부처 소관의 국유림으로 지정목적은 훼손하지 않는 범위에서의 최소 별채만 가능하므로, 본 연구에서는 모든 공익용산지는 목재수확이 불가능한 것으로 가정하였다. 또한 「지속가능한 산림자원 관리지침」에서 지정하고 있는 별채금지 구역은 수변 만수위로부터 30 m 이내와 임연부 산림과 산림이 아닌 지역의 경계지점으로부터 산림구역 방향으로 30 m 내외까지의 거리를 포함한다.

한편 법적으로 목재수확이 금지된 것은 아니지만, 지형적·기술적 제약으로 인해 현실적으로 목재수확이 어

려운 구역 또한 존재한다. 지형적 제약은 경사 40도를 초과하는 것으로, 이 기준은 국내에서 개발된 타워야더 HAM300의 집재 최대 경사가 45도, 임업용 트랙터의 최대 경사가 40도라는 점과 Shiba(1993)의 연구에서 가선계를 이용한 임목반출 영역이 최대 40도로 보고된 점에 근거하여 설정하였다. 기술적 제약은 임도 및 도로로부터 300m를 초과한 것으로, 이는 가장 최신의 가선집재 기계인 HAM300의 최대 집재거리가 300m인 것에 근거하여 설정하였다(Kim et al., 2017).

위와 같은 법적, 지리적, 기술적 제약조건을 고려한 국유림의 목재생산 잠재량을 분석하기 위해 산림자원 현황, 소유구분, 산지구분, 수계분포, 지형적 입지, 접근성과 관련된 최신의 공간자료를 수집하였다(Table 1), 공간분석도구인 ArcMap 10.4.1과 QGIS Desktop 3.22.5를 이용하여 산림공간정보 DB를 구축하였다.

본 연구는 구축된 산림공간정보 DB를 바탕으로 상기 기술한 목재수확의 제약조건을 순차적으로 적용하여 국유림 내에서 목재생산이 가능한 지역을 추출하였다. 수계의 경우 하천망도를 이용하여 국가하천, 지방하천, 소하천에 대해 30 m buffer를 설정하였고, 임연부의 면적은 수치임상도에서 산림 방향으로 30 m buffer를 설정하여 그 공간 범위를 산출하였다.

또한 경사도의 경우 수치표고모델로부터 1 ha를 기본 단위로 하여 경사도를 분석하였고, 기술적 제약조건인 도로로부터의 거리는 임도망도와 도로망도를 이용하여 이들 노망으로부터 300 m buffer를 설정하였다. 이때 도로망도의 경우, 임목수확작업과 직접적 관련이 있는 도로만 고려하기 위해 산림 내부에 위치한 도로를 사용하였다.

한편, 목재생산 잠재량은 목재생산 가능 지역에 분포하는 임목축적량을 기준으로 추정할 수 있다. 본 연구에서는 지역에 따른 현실 임분의 생장 특성을 고려하기 위해 Won et al.(2010)이 개발한 지역별 임분재적 추정식을 이용하여

목재생산 잠재량을 산출하였다. 해당 식은 국내 6개의 주요 수종(소나무, 잣나무, 낙엽송, 리기다소나무, 활엽수, 혼효림)에 대해 지역별(도 단위)로 작성되었다. 수치임상도에서 확인 가능한 이밖의 다른 수종의 경우, 6개 주요 수종과의 유사도를 고려하여 이들 추정식 중 하나를 적용하여 분석하였다. 아래 식에서 Vol 은 ha당 재적(m^3/ha), Age 는 영급, $a \cdot b$ 는 회귀계수를 의미한다. 회귀계수는 국가산림자원조사 자료에 기반하여 개발되었으며(Table 2) 제주도의 경우 별도로 추정식이 개발되지 않았기 때문에, 지리적으로 가장 근접한 전라남도의 추정식을 적용하여 분석하였다.

$$Vol = a + b \cdot Age \quad (1)$$

Vol: ha당 재적(m^3/ha), Age: 영급, $a \cdot b$: 회귀계수

4. 다목적 산림경영계획모델 구축

본 연구에서는 국유림의 경제적, 공익적 기능을 고려하기 위한 다목적 산림경영계획 모델을 구축하였다. 이를 위해 경제적 기능으로 목재생산, 공익적 기능으로 탄소저장, 수원함양, 대기정화기능을 선정하여 네 가지 경영목표를 동시에 달성하고자 하였다. 공익적 기능은 자료의 취득 용이성과 정량화 가능성을 고려하여 선정하였다.

산림경영계획의 수식모형은 시업 변화와 수종 갱신을 고려할 수 있는 ModelII를 채택하였다. 이에 따라 의사결정변수는 X_{ijkl} 로 정의했으며, 이때 X 는 경영구역, i 는 조립분기, j 는 기존수종, k 는 목재수확분기, l 은 갱신수종을 의미한다. 즉, 의사결정변수 X_{ijkl} 는 경영구역 X 에서 i 분기에 조립한 수종 j 를 k 분기에 벌채하고, l 수종으로 갱신한 면적을 의미한다.

이를 기반으로 개발한 수식모형은 식 2 - 식 16과 같고, 모형에 사용된 함수와 변수는 Table 3에 정리되어 있다.

Table 1. Spatial data for estimating timber production potential.

Spatial data	Year of establishment	Scale	Responsible authority
Digital forest map	2020	1:5,000	Korea Forest Service
Land ownership map	2022		Ministry of Environment
Forest utilization map	2022		Korea Forest Service
River network map	2021		Ministry of Environment
Forest road map	2019		Ministry of Land, Infrastructure and Transport
Road network map	2020		Ministry of Land, Infrastructure and Transport
Digital elevation map	2020	10 m × 10 m	Korea Forest Service

Table 2. Equations for forest growing stock by region and species (Won et al., 2010).

Region	Species	Equation	Region	Species	Equation
Kangwon	<i>Pinus densiflora</i>	$Y = 63.409X - 37.519$	Jeonnam	<i>Pinus densiflora</i>	$Y = 49.358X - 17.9$
	<i>Pine koraiensis</i>	$Y = 68.681X - 67.668$		<i>Pine koraiensis</i>	$Y = 63.658X - 63.331$
	<i>Larix kaempferi</i>	$Y = 50.261X - 2.2349$		<i>Larix kaempferi</i>	$Y = 58.850X - 38.981$
	<i>Pines ridida</i>	$Y = 60.577X - 3.2896$		<i>Pines ridida</i>	$Y = 66.256X - 47.963$
	Broad-leaved	$Y = 37.380X + 3.0649$		Broad-leaved	$Y = 44.670X - 21.006$
	Mixed	$Y = 60.795X - 45.833$		Mixed	$Y = 52.656X - 32.501$
Gyeonggi	<i>Pinus densiflora</i>	$Y = 51.020X - 18.414$	Jeonbuk	<i>Pinus densiflora</i>	$Y = 46.583X - 10.233$
	<i>Pine koraiensis</i>	$Y = 64.854X - 58.107$		<i>Pine koraiensis</i>	$Y = 65.630X - 52.956$
	<i>Larix kaempferi</i>	$Y = 40.858X + 23.908$		<i>Larix kaempferi</i>	$Y = 50.880X - 4.4751$
	<i>Pines ridida</i>	$Y = 58.098X - 20.3$		<i>Pines ridida</i>	$Y = 62.345X - 36.37$
	Broad-leaved	$Y = 39.891X + 0.9597$		Broad-leaved	$Y = 37.500X - 1.0875$
	Mixed	$Y = 58.712X - 40.769$		Mixed	$Y = 56.243X - 40.125$
Gyeongnam	<i>Pinus densiflora</i>	$Y = 49.434X - 21.596$	Chungnam	<i>Pinus densiflora</i>	$Y = 44.131X - 6.2369$
	<i>Pine koraiensis</i>	$Y = 62.312X - 44.09$		<i>Pine koraiensis</i>	$Y = 58.696X - 42.51$
	<i>Larix kaempferi</i>	$Y = 52.589X - 15.39$		<i>Larix kaempferi</i>	$Y = 47.798X - 7.3562$
	<i>Pines ridida</i>	$Y = 57.766X - 27.816$		<i>Pines ridida</i>	$Y = 55.158X - 22.32$
	Broad-leaved	$Y = 40.252X - 9.0643$		Broad-leaved	$Y = 37.167X - 3.6029$
	Mixed	$Y = 45.103X - 15.693$		Mixed	$Y = 51.003X - 30.027$
Gyeongbuk	<i>Pinus densiflora</i>	$Y = 51.757X - 27.696$	Chungbuk	<i>Pinus densiflora</i>	$Y = 48.167X - 16.337$
	<i>Pine koraiensis</i>	$Y = 66.129X - 68.206$		<i>Pine koraiensis</i>	$Y = 50.389X - 26.762$
	<i>Larix kaempferi</i>	$Y = 49.357X - 8.2539$		<i>Larix kaempferi</i>	$Y = 48.751X - 4.8984$
	<i>Pines ridida</i>	$Y = 54.482X - 21.319$		<i>Pines ridida</i>	$Y = 60.341X - 28.426$
	Broad-leaved	$Y = 36.319X + 2.9693$		Broad-leaved	$Y = 39.747X + 0.2826$
	Mixed	$Y = 52.683X - 31.89$		Mixed	$Y = 56.087X - 32.564$

* X : Age-class, Y: Growing stock (m³/ha)

Table 3. Decision variable and parameters of the multi-objective linear programming (MOLP) model.

Elements	Description
X_{ijkl}	Area of species j planted in period i that harvested and regenerated to species l at period j in management zone X (ha)
w_h	Weight of timber production
w_c	Weight of carbon storage
w_w	Weight of water storage
w_m	Weight of air purification
TV_p	Timber production volume form thinning at period p (m^3)
HV_p	Timber production volume form final cutting at period p (m^3)
tr_p	Net present value of revenue from thinning at period p (Korean won)
tc_p	Net present value of cost from thinning at period p (Korean won)
hr_p	Net present value of revenue from final cutting at period p (Korean won)
hc_p	Net present value of cost from final cutting at period p (Korean won)
C_p	Net present value of carbon storage at period p (Korean won)
W_p	Net present value of water storage at period p (Korean won)
M_p	Net present value of fine dust absorption at period p (Korean won)
hv_{Xijkp}	Final cutting volume of species j in period p that planted at period i and harvested at period k in management zone X (m^3/ha)
tv_{Xijkp}	Thinning volume of species j in period p that planted at period i and harvested at period k in management zone X (m^3/ha)
HV_p	Final cutting volume at period p (m^3)
TV_p	Thinning volume at period p (m^3)
v_{Xijp}	Residual volume of species j at period p , that planted at period i in management zone X (m^3)
V_{rp}	Volume of species r at period p (m^3)
c_r	Carbon emission factor of species r
w_{Xijp}	The amount of water storage of species j at period p , that planted at period i in management zone X (ton)
m_r	The amount of fine dust absorption of species r
α	Allowable decreasing rate in timber production (%)
β	Allowable increasing rate in timber production (%)
AC_{np}	Area of age-class n at period p (ha)
γ_{np}	Lower bound area of age-class n at period p (ha)
$Area$	Total area (ha)
δ_{rp}	Lower bound area of species r at period p (ha)
ϵ_{rp}	Upper bound area of species r at period p (ha)
A_{Xrp}	Area of species r at period p in management zone X (ha)
XA	Acea of management zone X (ha)
ζ_p	Lower bound area of conifers trees at period p (ha)
η_p	Upper bound area of conifers trees at period p (ha)
CA_p	Area of conifers trees at period p (ha)
θ_p	Lower bound area of Broad-leaveds at period p (ha)
ι_p	Upper bound area of Broad-leaveds at period p (ha)
BA_p	Area of Broad-leaveds at period p (ha)

$$\begin{aligned}
 &Max w_h \left(\sum_p \sum_i \sum_j \sum_k \sum_l (tr_p \times TV_p - tc_p) \times X_{ijkl} \right. \\
 &+ \sum_p \sum_i \sum_j \sum_k \sum_l (hr_p \times HV_p - hc_p) \times X_{ijkl} \\
 &+ w_c \sum_p \sum_i \sum_j \sum_k \sum_l C_p \times X_{ijkl} \\
 &+ w_w \sum_p \sum_i \sum_j \sum_k \sum_l W_p \times X_{ijkl} \\
 &+ w_m \sum_p \sum_i \sum_j \sum_k \sum_l M_p \times X_{ijkl}
 \end{aligned} \tag{2}$$

subject to

$$\sum_i \sum_j \sum_k \sum_l X_{ijkl} - \sum_{i=qj=r} \sum_k \sum_l X_{ijkl} = 0 \quad (p < q) \tag{3}$$

$$\sum_i \sum_j \sum_k \sum_l (hv_{X_{ijkp}} \times X_{ijkl}) - HV_p = 0 \tag{4}$$

$$\sum_i \sum_j \sum_k \sum_l (tv_{X_{ijkp}} \times X_{ijkl}) - TV_p = 0 \tag{5}$$

$$HV_p + TV_p - H_p = 0 \tag{6}$$

$$\sum_i \sum_k \sum_l (v_{X_{irkp}} \times X_{ijkl}) - V_{rp} = 0 \tag{7}$$

$$\sum_r (c_r \times 0.5 \times 3.66 \times V_{rp}) - C_p = 0 \tag{8}$$

$$\sum_i \sum_j \sum_k \sum_l (w_{X_{ijp}} \times X_{ijkl}) - W_p = 0 \tag{9}$$

$$\sum_r (m_r \times V_{rp}) - M_p = 0 \tag{10}$$

$$(1 - \alpha)H_{p-1} \leq H_p \leq (1 + \beta)H_{p-1} \tag{11}$$

$$AC_{np} \geq \gamma_{np} \times Area \tag{12}$$

$$\delta_{rp} \times XA \leq A_{Xrp} \leq \epsilon_{rp} \times XA \tag{13}$$

$$\zeta_p \times Area \leq CA_p \leq \eta_p \times Area \tag{14}$$

$$\theta_p \times Area \leq BA_p \leq \iota_p \times Area \tag{15}$$

$$X_{ijkl} \geq 0 \quad (\forall i, j, k, l) \tag{16}$$

식 2는 모형의 목적함수로서, 목재생산, 탄소저장, 수원함양, 대기정화기능의 가중치가 반영된 종합적 순현재가치를 최대화하는 것을 목표로 한다. 본 연구에서는 각 기능의 순현재가치를 산출하기 위해서 먼저 기능별 총량을 구한 뒤, 이를 경제적 가치로 환산하였다. 식 2의 계수(w_h, w_c, w_w, w_m)는 각 기능의 가중치이며, 중요도에 따라 가중치를 다르게 적용할 수 있다. 식 3부터 식 16에 해당하는

수식은 모형의 제약조건을 나타내며 각각의 설명은 다음과 같다.

1) 목재수확 및 조림면적

ModelIII의 의사결정변수는 갱신부터 주벌까지 유지되어 주벌 이후 해당 의사결정변수는 다른 의사결정변수로 나뉘거나 새로운 의사결정변수로 변환된다(Kim et al., 2021). 따라서 식 3은 p분기에 벌채되어 r수종으로 갱신된 면적이 q분기에 r수종을 조림한 면적과 같다는 제약조건을 나타낸다.

2) 수확량 및 잔존재적, 비부조건

식 4, 식 5, 식 6은 각각 p분기의 주벌수확량, 간벌수확량, 총 수확량을 산출하는 식이며, 식 7은 목재수확 후 남아있는 재적을 산출하는 식이다. 주벌 및 간벌 수확량은 임분수확표를 기반으로 산출된 단위면적 당 목재수확량에 총 목재수확 면적을 곱하여 구할 수 있다. 식 16은 의사결정변수가 부의 값을 가질 수 없다는 비부조건을 나타내는 식이다.

3) 공익적 기능의 총량

모형에서 공익적 기능은 탄소저장, 수원함양, 대기정화 기능을 고려했으며, 각 기능의 양은 탄소저장량, 수원함양량, 미세먼지 흡수량을 통해 산출하였다. 식 8, 식 9, 식 10은 각각 p분기의 탄소저장량, 수원함양량, 미세먼지 흡수량을 계산하는 식을 나타낸다.

4) 분기별 목재수확량의 변화율

식 11은 목재생산의 보속성과 관련된 제약조건으로, 목재생산의 보속성은 매년 목재 수확량이 균등한 경영체계를 의미한다. 보속성 조건을 통해 인접분기 사이의 수확량을 일정하게 유지시켜 목재공급의 안정성을 유도할 수 있다. 현실적인 여건을 고려할 때 목재수확량을 완전히 일정하게 유지하는 것은 어렵기 때문에 분기별 목재수확량의 변화율을 제한하여 산림경영의 안정성을 유지하고자 했다. 식 11에서 H_p 는 p분기의 목재수확량, α 는 허용감소율, β 는 허용증가율을 의미한다.

5) 영급별 면적 비율

불균형한 영급구조를 개선하는 것은 지속가능한 산림경영원칙을 달성하기 위한 필수조건이다. 또한 계획기간 이후 상황에 대한 조건을 설정하지 않을 경우, 목적함수 값을 극대화하기 위해 계획기간 말에 벌기령에 도달한 모든 산림을 벌채하는 것을 최적해로 채택할 가능성이 있다 (Park and Chung, 1999, Kim et al., 2021). 따라서 식 12와

같이 계획기간 말에 각 영급에 대한 기준을 설정할 필요가 있다. 이론적으로는 모든 영급의 임분이 동일한 면적을 차지할 때, 법정영급균형이라 말할 수 있지만 이는 현실적으로 적용이 불가능하다. 따라서 법정림 개념을 도입하되, 동일한 면적보다는 각 영급이 차지하는 면적에 균형을 맞추는 것을 제약조건으로 설정하였다.

6) 수종별 면적 비율

수종에 따라 생물량, 벌기령, 탄소흡수량 등이 다르기 때문에 수종에 대한 제약조건을 설정하지 않으면 경영 목적에 따라 특정 수종 위주의 갱신이 일어날 수 있다. 또한 기후와 지역적 특성 등의 이유로 지방청에 따라 확대 혹은 축소하고자 하는 수종이 서로 다르므로 이러한 점을 반영하기 위해 식 13과 같이 수종별 · 경영구역별로 최소, 최대 면적 비율을 설정하였다.

7) 침엽수 · 활엽수의 면적 비율

임상에 따라 수원함양량, 미세먼지 흡수량 등에 차이가 있기 때문에 제약조건을 설정하지 않으면 임상이 단순화될 가능성이 있다. 본 연구는 이를 방지하기 위해 식 14, 식 15와 같이 침엽수와 활엽수의 최소, 최대 면적 비율을 설정하였다.

5. 적정 목재생산량 추정

본 연구에서는 국유림의 목재생산 가능 지역을 대상으로 앞서 개발한 다목적 경영계획모델을 적용하여 경제적 · 공익적 기능을 동시에 고려한 적정 목재생산량을 추정하였다. 전술한대로 각 지방청별로 구분된 경영구역에 적용하는 시업 체계는 지방청별 「지역산림계획」과 수종 및 주요

산림기능의 분포를 고려하여 Table 4와 같이 적용하였다.

국유림의 적정 목재생산량을 추정하기 위한 경영계획기간은 후계림의 임상변화를 분석하고자 수종별로 최소 1회 이상 벌채가 가능하도록 최장 벌기령의 약 1.5배인 100년으로 설정하였다. 계획기간을 10년 단위로 나누어 총 10분기로 구성하였고, 모든 경영활동은 각 분기의 중간에 실시하는 것으로 가정하였다.

모델 적용 시 시간의 흐름에 따른 임분의 생장은 수종별 임분수확표(NIFoS, 2021)를 참고하였고, 탄소저장량의 경우 국내에 개발된 수종별 탄소배출계수(KFRI, 2014)를 적용하여 수종별 임분재적에 곱하여 산출하였다.

한편 수원함양량은 토양층별(A층, B층) 평균토심과 조공극률의 곱으로 산출하였는데(Kim et al., 2010). 국유림 지역의 평균 토심은 산림입지도를 통해 취득하였고 조공극률은 Kim et al.(2010)이 제시한 수치를 참고하였다.

미세먼지 흡수량의 경우 소나무림의 미세먼지 흡착특성이 침엽수림의 대표한다고 가정하여 침엽수림과 활엽수림의 미세먼지 흡수량을 계산하였다. Kim et al.(2010)의 연구에 따르면 소나무 한 그루가 흡착할 수 있는 분진량은 19.22g으로 가정할 수 있고 임분수확표 상 소나무림의 ha당 평균 본수는 1,269본/ha이므로 소나무림의 연간 분진 흡착량은 0.024ton/ha/yr으로 산출된다. 이 값에 총 부유분진량 대비 미세먼지 배출량의 상대비율 73%와 연간 강수량 28.5%를 적용하면 침엽수림의 ha당 연간 총 미세먼지 흡수량을 구할 수 있으며, 그 값은 0.005ton/ha/yr이다. 활엽수림의 연간 총 미세먼지 흡수량은 침엽수의 연간 총 미세먼지 흡수량에 침엽수와 활엽수의 분진흡착잠재능력(Potential Dust-Retaining Capacity, PDRC) 상대비율인 0.44를 곱하여 산출하였다.

Table 4. Management regime by management zone.

Management zone	Forest function	Species	Rotation age (yr)	Thinning period (yr)	Thinning intensity (%)
North and South region	Forest disaster prevention	Pine (<i>Pinus densiflora</i>), Cypress (<i>Chamaecyparis obtusa</i>) Deciduous	60	20, 30, 40, 60	30%
		Larch (<i>Larix kaempferi</i>), Other conifers	50	20, 30, 40, 50	30%
		Rigida (<i>Pinus rigida</i>)	30	30	-
East, West, and Central region	Water conservation	Pine (<i>Pinus densiflora</i>), Cypress (<i>Chamaecyparis obtusa</i>) Deciduous	60	20, 30, 40, 60	15%
		Larch (<i>Larix kaempferi</i>), Other conifers	50	20, 30, 40, 50	10%
		Rigida (<i>Pinus rigida</i>)	30	30	-

Table 5. Model constraints for estimating optimal timber production in national forests.

Constraint	Description		
Sustained timber yield	$0.7H_{p-1} \leq H_p \leq 1.3H_{p-1}$ (H_p : Harvest volume at period p)		
Age-class distribution	All age-class	Min.	10%
Ratio in area by species	Larch (<i>Larix kaempferi</i>)	Min.	30%
	Deciduous		10%
Ratio in area by forest stand	Pine (<i>Pinus densiflora</i>)	Max.	20%
	Conifers	Min.	25%
	Deciduous		25%

본 연구에서는 MOLP 모델에서 다루는 네 가지 기능을 동일한 기능으로 평가하기 위하여 측정 단위를 경제적 가치로 통일하였다. 즉, 목재생산, 탄소저장, 수원함양, 대기정화 기능의 가치를 화폐가치로 평가한 뒤 이를 순현재가치로 환산하여 계산하였다.

목재생산의 경제적 가치는 목재로부터 얻는 수익에서 목재생산에 소요되는 비용을 제한 순수익으로 산출하였으며 목재판매 수익의 경우 2021년 4분기 기준 국산재 원목 시장가격 조사 자료(KFS, 2022b)를 참고하였고 고시되지 않는 각종 시업 비용과 간벌 목재의 가격 등은 흥천 국유림 관리소의 국유임산물 매각상황 데이터와 조림·숲가꾸기 사업 추진내역을 기반으로 산출하였다(Kim et al., 2021).

탄소저장의 경제적 가치는 국유림의 탄소저장량에 탄소배출권 거래가격을 곱하여 산정하였으며 거래가격은 2016년부터 2021년까지 KOC의 평균 가격인 27,900원/tCO₂를 적용(Emissions Market Information Platform, 2022)하였다. 수원함양의 경제적 가치는 대체비용법을 적용하여 계산한 Kim et al.(2010)의 사례를 참고하여 톤 당 969.5원의 가치가 발생하는 것으로 가정하였고 대기정화 기능의 경제적 가치는 미세먼지 처리 비용에 근거하여 톤당 4,967천원을 적용하였다(Kim et al., 2010).

마지막으로 본 연구는 대상지의 현재 임분 상태와 각 지방산림청의 지역산림계획을 바탕으로 MOLP 모형에 입력할 제약조건의 기준값을 Table 5와 같이 결정하고 이를 분석에 활용하였다(Table 5).

연구결과 및 고찰

1. 국유림 목재생산 잠재량

우리나라 전체 산림 중 목재생산이 가능한 면적은 2,614천ha로 GIS 공간상으로 분석된 총 산림면적인 6,135천ha

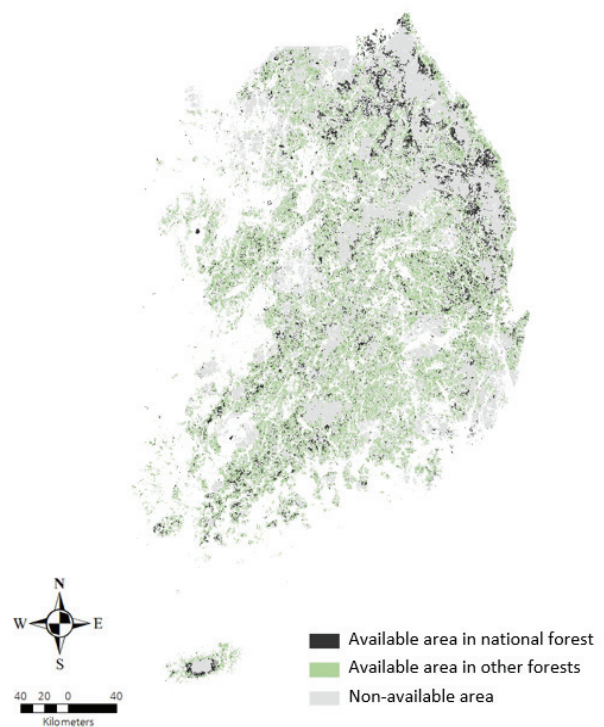
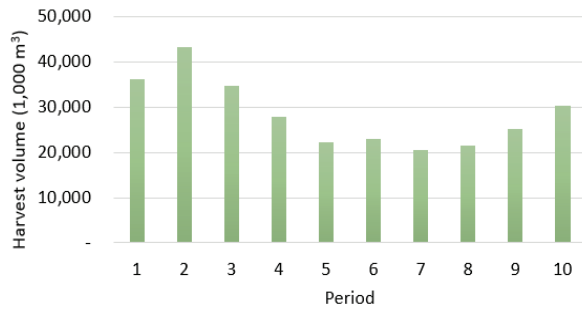


Figure 3. Timber production area available in national forests.

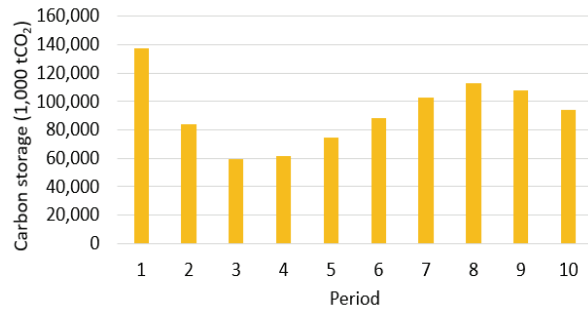
의 43%를 차지하며(Figure 3), 그 중 국유림이 차지하는 면적은 488천ha로 전체 목재생산 가능 지역의 19%에 해당하는 것으로 나타났다(Table 6). 2022년 산림임업기본 통계에 따르면 2021년 기준 우리나라 산림면적은 6,294천ha로 본 연구의 산림면적과 차이가 있는데, 이는 본 연구에서 사용한 임상도에 민간인 통제선 이북지역(민북 지역)이 포함되지 않았고, 임상도 제작 시 FAO(2015)에서 제시한 산림정의 기준을 적용하여 0.5ha 이하인 산림은 반영하지 않았기 때문이다. 이번 분석을 통해 밝혀진 국유림의 목재생산 잠재량은 약 87,639천m³으로, 우리나라 전체에서 생산 가능한 목재 자원량의 약 20%를 차지한다.

Table 6. Available production area by ownerships.

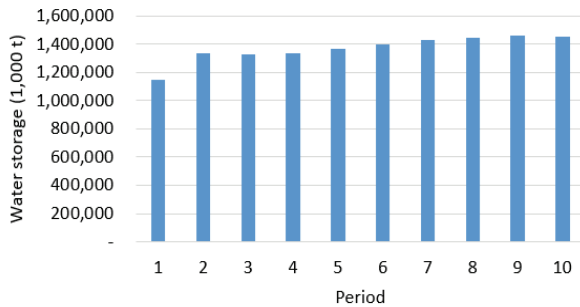
Ownership	Entire Forests			Available for Timber Production		
	Area (1,000 ha)	Standing Stock (1,000 m ³)	Stock per ha (m ³ /ha)	Area (1,000 ha)	Standing Stock (1,000 m ³)	Stock per ha (m ³ /ha)
National	1,839	357,742	195	488	87,639	179
Public	717	128,814	180	322	55,365	172
Private	3,579	595,710	166	1,803	286,952	159
Total	6,135	1,082,266	176	2,614	429,956	165



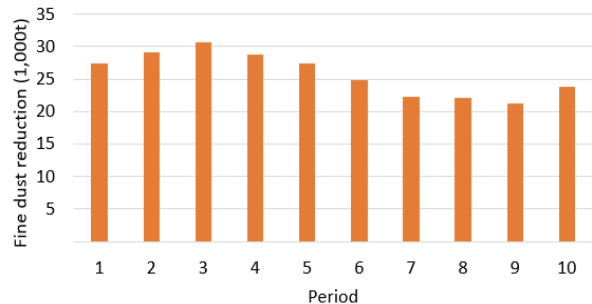
(a) Timber production



(b) Carbon storage



(c) Water storage



(d) Fine dust reduction

Figure 4. Changes in the amount of timber harvest and public functions by periods.

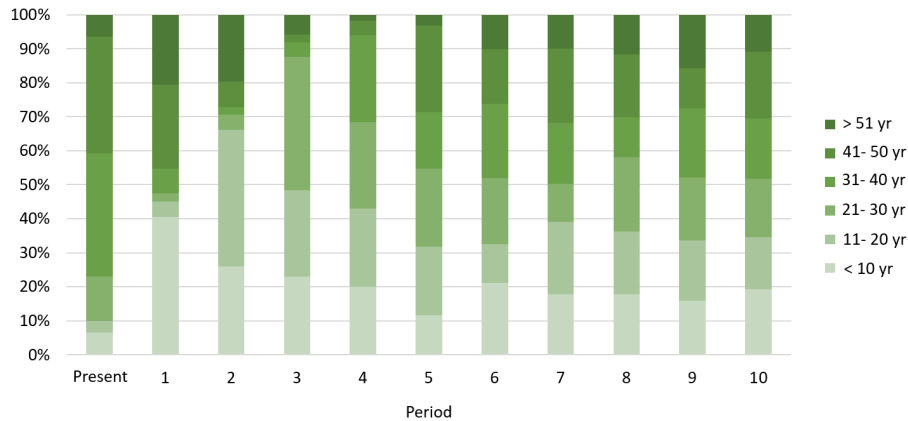
이 결과로부터 주목할 만한 사실은 현재 국유림이 차지하는 면적 비율이 전체 산림의 26%인데 반해 목재생산 가능 지역 중 국유림이 차지하는 면적 비율은 19%로 그보다 낮게 도출되었다는 점이다. 상대적으로 국유림은 사유림에 비해 산 능선이나 정상부 등에 위치하고 있는데 이러한 특성으로 인해 국유림의 면적 점유율에 비해 목재생산 가능 면적이 작게 도출된 것으로 보인다. 따라서 국유림의 목재생산 잠재량을 늘리기 위해서는 임도의 개설 등과 같이 지형적 요인을 극복하기 위한 노력들이 필요한 것으로 판단된다.

2. 국유림의 적정 목재생산량

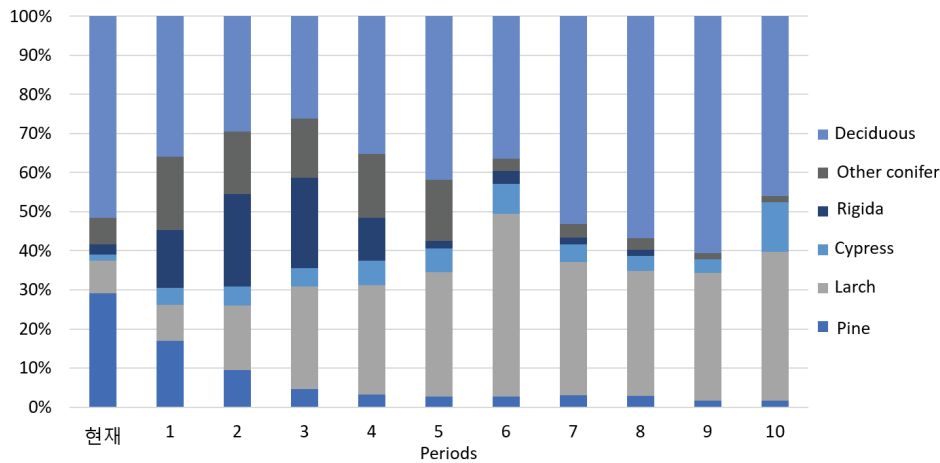
모델 실행 결과, 의사결정변수인 X_{ijkl} 의 값을 통해 경영

구역별·분기별·수종별 수확 및 갱신에 대한 수치를 알 수 있으며 이를 통해 분기별 적정 목재생산량을 산출할 수 있다[Figure 4(a)]. 전체 계획기간(100년) 동안 국유림 목재생산 가능지역에서 공급할 수 있는 총 목재량은 약 200백만m³으로, 분기별(10년) 평균 20백만m³ 정도의 목재가 국유림으로부터 공급될 수 있는 것으로 나타났다. 이를 연간으로 환산하면 2021년 기준 최근 10년간 국산원목의 연평균 공급량 450만m³(KFS, 2022b)의 약 44%인 200만 m³의 목재가 국유림으로부터 공급이 가능할 것으로 추정된다. 이러한 수치는 국유림 내 목재생산 가능 지역 면적이 전체 가능면적의 19%임을 감안할 때 국유림의 단위면적 당 목재공급 능력이 매우 높다고 평가할 수 있다.

분기별 목재생산량의 경우 2분기까지는 증가하다 다시



(a) Age-class distribution



(b) Species distribution

Figure 5. Changes in age-class and species distribution by periods.

Table 7. Total amount and net present value (NPV) of economic and public functions provided by national forests during the planning period (100 years).

Function	Total amount	NPV ⁴
Timber production	200,026 ¹	8,035
Carbon storage	794,292 ²	12,495
Water storage	10,367,154 ³	4,843
Fine dust reduction	172 ³	328

¹1,000m³, ²1,000tCO₂, ³1,000ton, ⁴100 Million KRW

감소하는 것으로 나타났는데 이는 계획기간 초기 불균형한 영급구조를 개선하기 위해 목재수확 면적을 늘리기 때문인 것으로 보인다. 하지만 이렇게 증가된 목재생산량은 다시 감소하다 7분기 이후 증가하는 것으로 나타났다.

3. 국유림의 공익기능 변화

모델 실행의 결과로 각 기능의 총량과 순현재가치에 대한 수치가 산출되며(Table 7), 목재생산량과 마찬가지로 분기별 탄소저장량, 수원함양량, 미세먼지 흡수량의 변화를 파악할 수 있다[Figure 4(b), 4(c), 4(d)].

탄소저장량의 경우 영급조절을 위한 목재생산량의 증가로 계획기간 초기 30년 동안에는 감소하나 그 이후 다시 증가하여 일정한 수준을 유지할 수 있는 것으로 나타났다. 수원함양 기능의 경우에도 분기가 진행될수록 해당 기능이 높아지는 것으로 나타났다. 다만 미세먼지 흡수량의 경우 초기 30년 동안 증가하다 감소하는 추이를 보였는데, 이는 분기가 진행될수록 수종별 다양성 유지를 위해 미세먼지 흡착능력이 상대적으로 낮은 활엽수림의 면적이 늘어나면서[Figure 5(b)], 전체적인 흡수량이 줄어드는 것으로 보인다. 하지만 이러한 경향도 계획기간 말인 10분기에는 다시 일정부분 회복하는 것으로 나타났다.

4. 영급 및 수종 분포의 변화

국유림의 영급 불균형 개선을 위해 모델에 계획기간 말 영급별 면적이 10% 이상 차지하도록 제약조건을 설정하였고, 그 결과 6분기 이후로 영급 구조가 안정적으로 변화함을 확인할 수 있었다[Figure 5(a)]. Figure 5(a)에서 현재와 계획기간 말의 영급 분포를 비교하면, 현재는 4영급 이상이 약 77%를 차지하는 반면 10분기에는 각 영급의 비율이 대체로 균형 잡힌 구조를 나타내는 것으로 분석되었다. 수종 분포 또한 설정한 제약조건에 따라 변화하며, 계획분기 말에는 현재에 비해 소나무는 감소하며, 낙엽송과 활엽수는 증가하는 것으로 나타났다[Figure 5(b)]. 리기다소나무의 경우 9분기 이후로 존재하지 않는데, 이는 각 지방청의 계획에 따라 리기다소나무에 대한 계획기간 말 분포 조건을 설정하지 않았기 때문이다. 만약 특정 수종의 분포가 필요하다면 리기다소나무의 경우와 같이 제약조건을 통해 조절할 수 있다.

결론

산림의 공익적 기능에 대한 수요가 증가함에 따라 산림의 전통적 기능인 목재생산과 함께 공익적 기능을 고려할 수 있는 산림경영의 중요성이 커지고 있다. 특히 국유림은 민유림에 비해 높은 수준의 자본, 기술, 노동력 등을 투입할 수 있는 장점이 있으며 집약적 관리가 이루어졌다는 점에서 산림의 다양한 기능을 안정적으로 발휘할 가능성이 높다고 평가된다. 따라서 산림의 다양한 기능을 고려한 국유림 경영이 요구되며 국유림 확대를 위한 국가적 차원의 노력이 이루어지고 있다. 하지만 우리나라 국유림은 4영급 이상의 임분이 대부분을 차지하여 영급이 불균형한 상태로 목재수확기에 도달하고 있으며, 이러한 상태에서는 국유림의 지속가능성을 보장하기 어렵다. 이를 해결하기 위해 영급 구조의 전환이 필요하며 장기적 관점에서 체계적인 수확 계획이 요구된다. 이에 본 연구는 우리나라 국유림의 경제적·공익적 기능을 동시에 고려할 수 있는 산림경영계획모델을 수립하여 영급구조를 개선하면서도 공익적 기능의 발휘를 훼손하지 않는 적정 목재생산량을 추정하였다.

분석 결과, 국유림 내 목재생산 적합 지역의 면적은 약 488천ha로, 이를 중심으로 목재수확을 적절하게 관리하면 영급분포가 개선되고 공익적 기능도 지속가능하게 유지되는 것으로 나타났다. 향후 100년 동안 국유림에서 생산 가능한 목재량은 연평균 약 200만³으로, 이는 연간 국산 목재 공급량의 44% 수준을 차지하는 것으로 나타났다. 특히 국유림의 경우 그동안의 집약적인 관리로 사유림에 비

해 단위면적당 목재생산 능력이 우수한 것으로 나타났다.

다만 급한 경사나 높은 해발고도 등 상대적으로 불리한 목재생산 여건을 극복하기 위해서는 임도개설과 같은 산림경영기반시설의 투자가 지속적으로 이루어질 필요가 있다. 만약 임도의 추가 개설이 이루어져 국유림 내 목재수확 가능 면적이 넓어지면, 본 연구에서 분석된 연평균 200만³ 보다 더 많은 목재를 매년 국유림으로부터 공급할 수 있을 것이다. 아울러 국유림을 지속적으로 확대하여 국유림의 목재공급의 비축기지로서의 잠재량을 키우고 국유림을 통해 국민에게 다양한 공익적 기능을 제공하기 위한 정책적 노력도 필요하다.

감사의 글

본 연구는 산림청(한국임업진흥원) 산림과학기술 연구개발사업(FTIS 2023474B10-2325-BB01)의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

References

- Chang, C.S. and Seok, H.D. 1995. A study on the timber resource management model of national forest - focusing on timber production using goal programming. *Journal of Rural Development* 18(2): 31-44.
- Emission Market Information Platform. 2022. 2021 Emission market operations report. pp. 3.
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2015. Guide for country reporting for FRA 2015 - Appendix 1. pp. 4.
- Kim, D.Y., Han, H. and Chung, J.S. 2021. Optimal forest management for improving economic and public functions in Mt.Gari leading forest management zone. *Journal of Korean Society of Forest Science* 110(4): 665-677.
- Kim, D.Y., Han, H., Shin, J.H., Kim, Y.H. and Chang, Y.S. 2022. Economic and ecological impacts of adjusting the age-class structure in Korean forests: application of constraint on the period-to-period variation in timber production for long-term forest management. *Forests* 13(12): 2144.
- Kim, J.H., Kim, K.D., Kim, R.H., Yoon, H.J., Lee, S.W., Choi, H.T., Kim, J.J. and Park, C.Y. 2010. Quantitative Study on the Public Service Function of Forests. Research Report No. 10-26. Seoul. National Institute of Forest Science. pp. 17.
- Kim, M.K., Baek, S.A., Cho, K.H. and Jung, D.H. 2017. Productivity, cost, and optimal forest road network

- density of tree-length yarding operations with tower yarder. *Journal of Korean Society of Forest Science* 106(3): 300-309.
- Kim, Y.H., You, J.W., Yim, J.S., Lee, S.H. and Park, J.W. 2020. Analysis of forest resources and timber production potential of *Larix kaempferi* in South Korea. *Journal of Korean Society of Forest Science* 109(4): 454-460.
- KFRI (Korea Forest Research Institute). 2014. Carbon emission factors and biomass allometric equations by species in Korea. pp. 97.
- KFS (Korea Forest Service). 2022a. Statistical yearbook of forestry. pp. 438.
- KFS (Korea Forest Service). 2022b. Domestic timber market price trends in Q4 2021. pp. 79.
- Kwon, O.B. and Chang, C.S. 1988. The application of various forest resource planning models to forest management in Korea -Model I vs. Model II-. *Journal of Korean Forest Society* 77(4): 389-400.
- Lee et al. 2012. Predicting distributional change of forest cover and volume in future climate of South Korea. *Forest Science and Technology* 8(2): 105-115.
- NIFoS (National Institute of Forest Science). 2021. Standing stock · biomass and yield table. pp. 361.
- Park, E.S. and Chung, J.S. 1999. An application of linear programming to multiple-use forest management planning. *Journal of Korean Forest Society* 88(2): 273-281.
- Park, E.S. and Chung, J.S. 2000. Optimal forest management planning for carbon sequestration and timber production using multi-objective linear programming. *Journal of Korean Forest Society* 89(3): 335-341.
- Park, J.M., Lee, J.S., Lee, H.S. and Park, J.W. 2020. Study on timber yield regulation method using probability density function. *Journal of Korean Society of Forest Science* 109(4): 504-511.
- Reese, H., Nilsson, M., Pahlén, T.G., Hagner, O., Joyce, S., Tingelöf, U., Egberth, M. and Olsson, H. 2003. Countrywide estimates of forest variables using satellite data and field data from the national forest inventory. *AMBIO: A Journal of the Human Environment* 32(8): 542-548.
- Shiba, M. 1993. Optimization of forest road network measurement and evaluation method by alternative comparison (V) - evaluation of alternative road network measurement in Mie university forest through value analysis. *Journal of the Japanese Forestry Society* 75(5): 431-439.
- Son, Y.M., Lee, K.H. and Kim, R.H. 2007. Estimation of forest biomass in Korea. *Journal of Korean Forest Society* 96(4): 477-482.
- Verkerk, P.J., Fitzgerald, J.B., Datta, P., Dees, M., Hengeveld, G.M., Lindner, M. and Zudin, S. 2019. Spatial distribution of the potential forest biomass availability in Europe. *Forest Ecosystems* 6:5
- Viana, H., Cohen, W.B., Lopes, D. and Aranha, J. 2010. Assessment of forest biomass for use as energy. GIS-based analysis of geographical availability and locations of wood-fired power plants in Portugal. *Applied Energy* 87(8): 2551-2560.
- Won, H.K., Kim, Y.H., Lee, K.H. and Jang, K.M. 2010. Application of fuzzy linear programming to estimate the potentiality of domestic long-term wood supply. *Journal of Korean Forest Society* 99(6): 802-807.
- Won, H.K., Jang, K.M., Kim, Y.H., Lee, K.H. and Kim, H.H. 2011. Estimation of potential wood supply by according to geographical and forest management conditions in Korea. *Journal of Agriculture & Life Science* 45(3): 35-41.
- Woo, J.C. 1991. Forest management planning by linear programming - timber harvest scheduling of a Korean pine stand -. *Journal of Korean Forest Society* 80(4): 427-435.

Manuscript Received : October 23, 2023

First Revision : November 25, 2023

Second Revision : December 18, 2023

Accepted : December 18, 2023