

가리산 선도산림경영단지의 경제적·공익적 기능 증진을 위한 산림관리 최적화 방안

김다영¹ · 한 희² · 정주상^{1,3*}

¹서울대학교 농림생물자원학부, ²국립산림과학원 산림정책연구과, ³서울대학교 농업생명과학연구원

Optimal Forest Management for Improving Economic and Public Functions in Mt.Gari Leading Forest Management Zone

Dayoung Kim¹, Hee Han² and Joosang Chung^{1,3*}

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

²Division of Forest Policy and Economics, National Institute of Forest Science, Seoul 02445, Korea

³Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

요약: 본 연구는 홍천 가리산 선도산림경영단지의 경제적·공익적 기능을 증진하기 위한 산림관리 최적화 방안과 목재 생산·탄소저장·수원함양 가치 사이의 상호관계를 분석하였다. 이를 위해 다목적 선형계획법을 이용하여 산림경영계획 모델을 개발하였다. 모델은 목재생산·탄소저장·수원함양의 가중치별 순현재가치의 합을 최대화하는 목적함수와 분기별 목재생산량의 변화율, 영급별·수종별 면적 비율, 경영구역별 침엽수·활엽수 면적 비율, 최소 목재생산량 및 목재판매액을 제약하는 조건식을 갖는다. 대상지의 산림조사부 및 종합계획을 바탕으로 현재 임분 정보와 경영계약요인을 분석하고, 목적함수의 기능별 가중치를 달리하여 경영대안을 구성하였다. 경영대안에 따라 최적해들을 비교한 결과, 목재생산·탄소저장·수원함양의 순현재가치 합은 한 가지 기능만 선택하여 최대화하는 대안보다 세 가지 기능을 동일한 비율로 고려하여 종합적 가치를 최대화하는 경영대안에서 가장 높게 나타났다. 또한 세 가지 기능이 동시에 작용할 때 목재생산 기능은 탄소저장 및 수원함양과 상쇄작용을 하였고, 탄소저장과 수원함양은 서로 상승작용을 하였다. 반면 세 가지 기능 중 두 가지만을 고려하는 경우에는 모든 기능 조합에서 서로 상쇄작용을 하였다. 따라서 한두 가지 기능보다는 세 가지 기능을 모두 고르게 고려하는 것이 가리산 선도산림경영단지의 가치를 최대화할 수 있는 것으로 나타났다.

Abstract: This study analyzed the optimization method of forest management to enhance economic and public functions, as well as the interrelationship among timber production, carbon storage, and water conservation functions in Mt.Gari leading forest management zone. For these purposes, a forest management planning model was developed using Multi-Objective Linear Programming. The model had an objective function to maximize the total NPV (Net Present Value) of weighted timber production, carbon storage, water conservation, and constraints to limit the rate of change in timber production, percentage of each age-class and tree species area, percentage of conifers and broad-leaved trees area in each management zone, minimum timber production and timber sales amount. Based on the description of forest inventory and the comprehensive plan of Mt.Gari, we analyzed stand information and management constraints of the study area. We compared management alternatives using different weights in the objective function. Therefore, the total NPV was maximized in the alternative considering the three functions in equal proportion, rather than the alternatives of maximizing only one function. When all three functions were considered simultaneously, timber production offset the carbon storage and water conservation, and carbon storage and water conservation interacted synergistically. However, when considering only two of the three functions, all combinations of functions demonstrated tradeoffs with one other. Therefore, we discovered that by considering all three functions equally, rather than only one or two functions, the economic and public values of the study area can be maximized.

Key words: optimal forest management plan, economic and public functions, multi-objective linear programming, net present value, Mt.Gari leading forest management zone

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

ORCID
Joosang Chung  <https://orcid.org/0000-0003-2592-7016>

서론

산림은 주요 온실가스 흡수원 중 하나로, 산림 내 입목뿐 아니라 산림토양 및 목재제품까지 탄소저장고의 역할을 한다(Korea Forest Service, 2016). 또한 산림은 수자원을 함양하고, 유량을 조절하며, 미세먼지의 발생을 억제하고, 야생동물을 보호하는 등 다양한 공익적 기능을 제공한다.

산림청은 「지속가능한 산림자원 관리지침」(Korea Forest Service, 2020)을 통해 산림의 각 기능을 증진하기 위한 구체적인 산림관리방안을 제공하고 있다. 이와 관련하여 Bae et al.(2008)은 목재생산 기능을 증진하기 위한 수종별 시업체계와 임분의 수원함양 기능 증진을 위한 관리방안, 산지토사재해 방지기능을 증진하기 위한 시업체계를 제시한 바 있다. 또한 Han et al.(2015)은 동적계획법을 이용하여 삼나무 임분의 목재 및 탄소 경영을 위한 간벌시업체계를 분석하였다. 이러한 임분 단위(Stand-level) 산림기능 증진에 관한 연구는 각 임분의 경영목적에 맞추어 특정 산림의 기능을 증진하기 위한 구체적인 경영방안을 제시한다는 점에서 의의가 있다.

하지만 산림이 제공하는 다양한 기능들은 서로 독립적인 것이 아니며 상호 연계되어 있다. 실제 산림을 경영할 때는 여러 개의 임분을 대상으로 하는 경우가 많고, 경영목적 또한 한 가지 이상인 경우가 많다. 그러므로 경관단위(Landscape-level)에서 여러 가지 기능들 사이의 관계를 이해하고 종합적으로 고려하는 것이 필요하다.

다목적 선형계획법(Multi-Objective Linear Programming, MOLP)은 상충되는 여러 가지 가치를 동시에 고려해야 하는 복잡한 현실의 문제 해결에 사용되는 수리계획법이다. 산림부문에 있어 MOLP는 대면적 산림에 대한 다목적 장기 경영계획을 수립하는데 꾸준히 이용되어 왔다. 일례로 Roise et al.(1990)은 MOLP를 이용하여 미국 남부지역 붉은벼슬딱다구리(Red-cockaded woodpecker) 서식지 보전과 목재생산의 목표를 충족시키기 위한 생산가능곡선(Production-possibility frontier)을 도출하였다. 또한 Hjortso and Straede(2001)는 리투아니아 산림을 대상으로 MOLP를 이용하여 경제적 가치에 초점을 둔 산림경영이 산림이 제공하는 환경적 가치에 어떠한 영향을 미치는지를 분석하였다. 국내의 경우 대표적으로 Park and Chung(2000)이 목재생산과 탄소저장을 동시에 극대화하기 위한 최적화 모델을 개발하였고, Seol(2014)이 제주도 한남시험림을 대상으로 목재생산과 주요 야생조류 보호종의 서식지를 함께 고려하는 의사결정모델을 개발한 연구 사례가 있다.

산림이 제공하는 다양한 기능 중 목재생산과 탄소저장, 수원함양은 산림경영 시 고려해야 할 가장 기본적이고 중요한 기능이라 할 수 있다. 우리나라 산림은 1970~80년대

에 집중적으로 조림되어 많은 면적이 목재수확기에 도달하고 있으므로, 계획적인 벌채와 갱신을 통해 목재를 안정적으로 공급하고 보속생산체계를 만드는 것이 필요하다. 기후위기에 직면하고 있는 우리 현실에서 주요 온실가스 흡수원 중 하나인 산림을 잘 관리하는 것 역시 매우 중요하다. 전술한 대로 산림은 그 안에 서 있는 나무들뿐만 아니라 산림토양, 수확되어 이용되는 목재제품까지도 탄소저장고의 역할을 한다. 사람이 살아가는데 필수적인 물을 지속가능하게 공급하는 산림의 역할 역시 산림경영에 빼놓을 수 없는 중요한 기능이다. 우리나라는 2003년 이후 국제인구행동연구소(Population Action International, PAI)에서 분류한 물스트레스 국가에 포함되어 있으며(K-water, 2021), 국민을 대상으로 한 설문조사에서도 ‘물부족 심화로 인한 산림수자원의 중요성 증대’가 산림과 임업의 중요한 미래 이슈 1위로 선정된 바 있다(Bae et al., 2017).

본 연구는 산림이 제공하는 다양한 기능의 효과적인 관리가 그 어느 때보다 중요해진 현재의 시점에서 MOLP를 이용하여 산림의 경제적·공익적 가치를 동시에 증진하기 위한 산림경영계획을 분석하고자 하였다. 특히 산림의 기능 중 목재생산과 탄소저장, 수원함양 기능에 주목하여 이들 세 가지 기능을 종합적으로 증진하기 위한 산림경영계획 모델을 개발하였다. 이러한 과정을 통해 산림의 다목적 기능을 극대화하기 위한 최적의 산림경영 전략과 그 안에서 목재생산·탄소저장·수원함양 기능 사이의 상호관계를 밝혀보고자 하였다.

재료 및 방법

1. 연구대상지

가리산 선도산림경영단지는 강원도 홍천군 화촌면 외 2개면에 걸쳐 위치하며, 2012년에 선도산림경영단지로 지정되었다. 선도산림경영단지는 산림의 규모화 및 집단화를 통해 산림투자의 효율성을 제고하고, 장기계획을 바탕으로 산림을 체계적으로 관리함으로써 산림경영의 성공 모델을 개발하고자 국가에서 지정하는 경영단지로, 2021년 기준 국유림 5개소와 사유림 21개소에서 운영되고 있다(Leading Forest Management Zone, 2021).

홍천국유림관리소는 가리산 선도산림경영단지 전체 면적(6,636 ha) 중 시업이 어렵거나 불가능한 지역을 제외하고 실제 경영이 가능한 구역을 집중경영구역으로 설정하여 관리하고 있다(Figure 1). 집중경영구역의 면적은 4,480 ha이며, 25개 임반 495개 소반으로 구성된다. 소반별 평균 표고는 300~900 m에 고르게 분포되어 있으며 경사는 각 소반별로 다양하다. 임종은 인공림이 82%, 천연림이 18%를 차지하며 평균 입목축적은 164 m³/ha, 임도밀도는 22

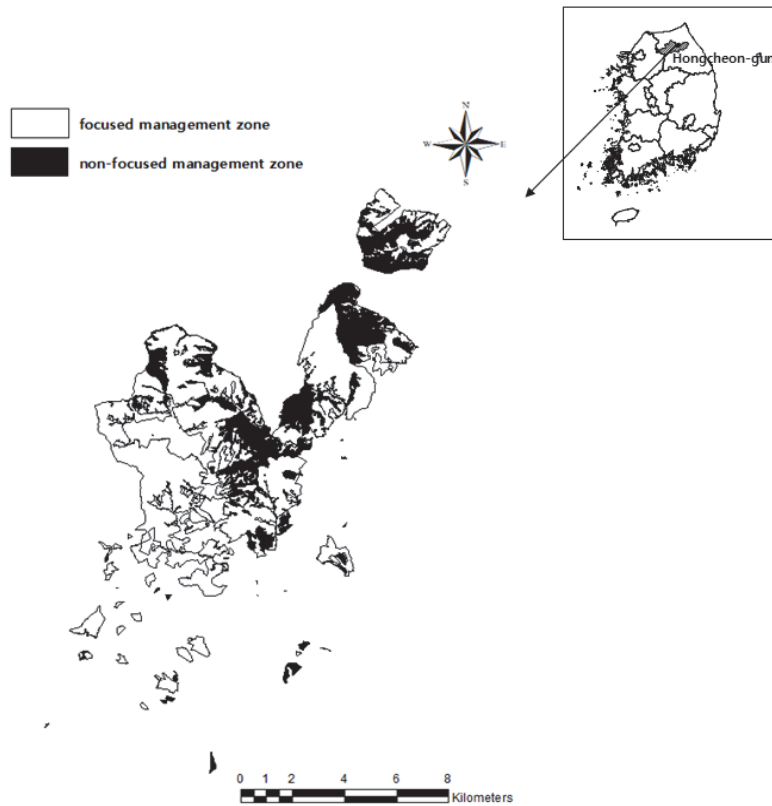


Figure 1. Map of the study area (Mt.Gari leading forest management zone).

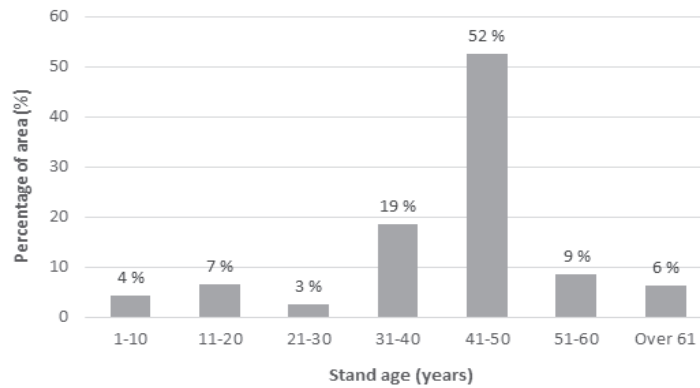


Figure 2. Stand age distribution of the study area.

m/ha이다. 주요 수종은 잣나무와 낙엽송으로, 잣나무가 전체의 약 36%, 낙엽송이 약 33%를 차지하며 그 외 기타침엽수와 활엽수가 일부 존재한다. 단지 내 영급 분포는 Figure 2에 나타난 바와 같이 4영급 이상의 임분이 약 86%를 차지하여 매우 불균형한 상태이다(Hongcheon National Forest Station, 2019).

2. 경영구역 구분

대면적 대상지에 대한 산림경영계획을 수립하는 경우

대상지 내 위치에 따라 임상이나 입지특성, 세부 경영목표 등이 다를 수 있다. 따라서 경영구역을 구분하고 구역별로 경영조건을 다르게 적용함으로써 대상지 내 상이한 공간적 특성을 반영할 수 있다. 본 연구는 가리산 선도산림경영단지의 집중경영구역 4,480 ha를 대상으로 산림기능과 유역, 지위지수를 기준으로 하여 대상지를 구분하였다 (Table 1).

먼저 산림기능에 따라 경관·생태기능, 수원함양기능, 목재생산기능의 세 구역(A, B, C~E)으로 구분하였다. 주

Table 1. Area and designated function of each management zone.

Management Zone	Area(ha)	Main Function
A	1,031	Aesthetic and Ecological process
B	264	Water conservation
C	1,541	Timber production
D	1,060	
E	584	
Total	4,480	

기능이 자연환경보전림인 산림과 경영·경관형 명품숲으로 지정된 산림을 경관·생태기능 구역으로 설정하였다. 수원함양기능 구역에는 주기능이 수원함양림인 산림과 한강수계로 지정된 산림을 포함하였다. 그 외 주기능이 목재생산림인 산림과 주기능이 산지재해방지림 또는 산림휴양림이면서 부기능이 목재생산림인 산림은 목재생산기능 구역으로 구분하였다.

이후 가장 면적이 넓은 목재생산기능 구역을 유역에 따라 다시 세 개의 세부구역(C, D, E)으로 구분하였다. 유역 분석을 위하여 대상지의 수치지형도를 이용해서 등고선을 추출한 후 수치표고모형을 제작하였다. 수치표고모형에서 흐름방향도를 만들어 함몰지형(sink)을 제거한 후 하계망을 추출하여 유역을 분석하였다.

마지막으로 지위지수에 따른 임분생장의 차이를 반영하기 위하여 지위지수에 따라 한 번 더 구역을 구분하였다. 구역별 지위지수를 상(H)과 하(L)로 나누어 총 10개의 경영구역(AH, AL, BH, BL, CH, CL, DH, DL, EH, EL)으로 구분하였다.

3. 수종별 시업체계 설정

수종은 잣나무, 낙엽송, 리기다소나무, 기타침엽수, 전락

활엽수, 기타활엽수의 6가지로 구분하였다. 잣나무와 낙엽송은 대상지 전체 면적의 약 69%를 차지하는 주요 수종이므로 따로 분류할 필요가 있다. 그 외 침엽수는 별기령에 따라 리기다소나무와 기타침엽수로 나누고, 활엽수는 전락활엽수와 기타활엽수로 구분하였다. 전락활엽수는 「가리산 선도산림경영단지 종합계획」(이하 종합계획)에서 앞으로 조림을 확대할 것으로 특별히 계획되어 있는 수종들로, 물푸레나무, 가래나무, 층층나무, 자작나무, 들메나무가 포함된다(Hongcheon National Forest Station, 2019).

시업은 솥아베기와 모두베기, 조림 작업으로 한정하여 경영구역별·수종별로 솥아베기의 시기와 횟수, 모두베기 시기를 설정하였다(Table 2). 먼저 목재생산기능 위주의 C, D, E구역에는 각 수종별로 국유림의 기준별기령을 적용하고, 별기령이 짧은 리기다소나무를 제외한 모든 수종은 2회의 솥아베기를 실시하는 것으로 설정하였다. 이를 기준으로 하여 A구역은 산림의 생태적 기능을 높이기 위하여 모두베기 시기를 기준별기령에서 10년 연장하고 리기다소나무의 솥아베기를 1회 추가하였다. 수원함양기능을 증진하기 위해서는 수관올폐도를 50~80%로 유지하는 것이 좋으며(Korea Forest Service, 2000), 울폐된 장령림에 대해 30%의 간벌을 자주 실시할 경우 수분 증산량을 줄일 수 있다(Bae et al., 2012). 따라서 수원함양기능 구역인 B 구역에서는 모든 수종에 대해 솥아베기를 1회씩 추가하고 별기령은 기준별기령을 따르도록 하였다. 조림은 모든 구역에서 모두베기 후 동일 분기 내에 실시하는 것으로 가정하였고 솥아베기의 강도는 30%로 일괄적용하였다.

4. 최적 산림경영계획 분석 모델

MOLP를 이용하여 가리산 선도산림경영단지의 경제적·공익적 가치 증진을 위한 최적 산림경영계획 분석 모델을 개발하였다. 전체 계획기간은 150년이며 10년 단위의

Table 2. Timing of thinning and final cutting according to tree species in each management zone.

(unit : year)

Management zone	Type of harvest	C ^a · K ^b · S ^c · B ^d	L ^e	R ^f
A	Thinning	20, 40	20, 40	20
	Final cutting	70	60	40
B	Thinning	20, 30, 40	20, 30, 40	20
	Final cutting	60	50	30
C · D · E	Thinning	20, 40	20, 40	-
	Final cutting	60	50	30

^a C : Other conifers.

^b K : *Pinus koraiensis*.

^c S : Strategic broad-leaved trees (*Fraxinus rhynchophylla*, *Juglans mandshurica*, *Cornus controversa*, *Betula platyphylla*, *Fraxinus mandshurica*).

^d B : Other broad-leaved trees.

^e L : *Larix kaempferi*.

^f R : *Pinus rigida*.

15분기로 구성하였다. 개발된 수식 모형은 아래와 같다.

$$Max Z = w_t \sum_p f(H_p) + w_c \sum_p g(C_p) + w_w \sum_p h(W_p) \quad (1)$$

subject to

$$\sum_i \sum_b \sum_{j=p} \sum_{a=s} Z_{ibja} - \sum_i \sum_b \sum_{j=s} \sum_a Z_{ibja} = 0 \quad (2)$$

$$(1 - \alpha)H_{p-1} \leq H_p \leq (1 + \beta)H_{p-1} \quad (3)$$

$$AC_{kp} \geq \gamma_{kp} \cdot AREA \quad (4)$$

$$\delta_{sp} \cdot AREA \leq A_{sp} \leq \epsilon_{sp} \cdot AREA \quad (5)$$

$$\zeta_{zp} \cdot AREA \leq CA_{zp} \leq \eta_{zp} \cdot AREA \quad (6)$$

$$\theta_{zp} \cdot AREA \leq BA_{zp} \leq \iota_{zp} \cdot AREA \quad (7)$$

$$VT_p \geq LVT_p \quad (8)$$

$$VH_p \geq LVH_p \quad (9)$$

$$TR_p \geq LTR_p \quad (10)$$

$$HR_p \geq LHR_p \quad (11)$$

$$Z_{ibja} \geq 0 \quad \forall i, b, j, a \quad (12)$$

Table 3. Description of variables applied to objective function and constraints.

f	: function for calculating NPV ^a of timber production
g	: function for calculating NPV ^a of carbon storage
h	: function for calculating NPV ^a of water conservation
w_t	: weight of timber production
w_c	: weight of carbon storage
w_w	: weight of water conservation
H_p	: timber production at period p
C_p	: carbon storage at period p
W_p	: water conservation at period p
Z_{ibja}	: area where species b was planted at period i , cut and regenerated to species a at period j in zone z
α	: allowable decreasing rate
β	: allowable increasing rate
AC_{kp}	: area of age-class k at period p
γ_{kp}	: lower bound area of age-class k at period p
$AREA$: total area of study area
A_{sp}	: area of species s at period p
δ_{sp}	: lower bound area of species s at period p
ϵ_{sp}	: upper bound area of species s at period p
CA_{zp}	: area of conifers at period p in zone z

ζ_{zp}	: lower bound area of conifers at period p in zone z
η_{zp}	: upper bound area of conifers at period p in zone z
BA_{zp}	: area of broad-leaved trees at period p in zone z
θ_{zp}	: lower bound area of broad-leaved trees at period p in zone z
ι_{zp}	: upper bound area of broad-leaved trees at period p in zone z
VT_p	: timber production from thinning at period p
LVT_p	: target timber production from thinning at period p
VH_p	: timber production from final cutting at period p
LVH_p	: target timber production from final cutting at period p
TR_p	: timber sales from thinning at period p
LTR_p	: target timber sales from thinning at period p
HR_p	: timber sales from final cutting at period p
LHR_p	: target timber sales from final cutting at period p

^a NPV : Net Present Value.

1) 의사결정변수

선형계획법을 이용한 산림경영 문제는 의사결정변수를 정의하는 방법에 따라 ModelI과 ModelIII로 구분된다 (Bettinger et al., 2009). 본 연구는 수종 갱신 및 시업 변화가 가능한 ModelIII를 이용하였다. 의사결정변수는 Z_{ibja} 로 정의되며, Z 는 경영구역, i 는 조림분기, b 는 기존수종, j 는 벌채분기, a 는 갱신수종이다. 즉, Z_{ibja} 는 Z 구역에서 i 분기에 조림한 b 수종을 j 분기에 벌채하여 a 수종으로 갱신하는 면적을 의미한다.

2) 목적함수

목적함수는 식 1과 같다. 모델은 계획기간 동안 가중치가 반영된 목재생산과 탄소저장, 수원함양의 순현재가치의 합을 최대화하는 것을 목적으로 한다.

H_p, C_p, W_p 는 각각 p 분기의 목재생산량, 탄소저장량, 수원함양량을 의미한다. 목재생산량(m^3)은 가리산 선도산림경영단지 산림조사부와 임분수확표(Kang et al., 2018)를 이용하여 예측하였고, 속아베기와 모두베기를 통해 생산되는 생산량을 구분하였다. 탄소저장량(tCO_2)은 분기별 잔존재적에 Son et al.(2014)이 개발한 한국 주요 수종별 탄소배출계수를 적용해 구하였다. 수원함양량(ton)은 Kim et al.(2010)의 「산림의 공익기능 계량화 연구」에 제시된 조공극률 계산식과 A층, B층의 평균토심을 이용하여 산정하였다.

w_t, w_c, w_w 는 각 기능의 가중치를 의미하며, f, g, h 는 각 기능의 순현재가치를 계산하는 함수다. 목재생산의 경제적 가치는 홍천국유림관리소의 2013~2018년 「국유임산물 매각상황 보고」 및 「숲가꾸기 추진내역」을 참고하여 계산하였다. 속아베기와 모두베기를 구분하였으며, 속아

Table 4. Unit profit and cost of harvest by tree species.

Species	Thinning		Final cutting	
	Profit (won/m ³)	Cost (won/ha)	Profit (won/m ³)	Cost (won/ha)
<i>Pinus koraiensis</i>	67,373	3,017,149	53,758	3,056,860
<i>Larix kaempferi</i>	79,176	3,017,149	68,905	3,284,293
<i>Pinus rigida</i>	43,227	3,017,149	32,859	3,415,347
Other conifers	64,209	3,017,149	99,121	3,415,347
Strategic broad-leaved trees ^a	46,780	3,017,149	19,042	4,120,029
Other broad-leaved trees	46,780	3,017,149	19,042	3,163,093

^a Strategic broad-leaved trees : *Fraxinus rhynchophylla*, *Juglans mandshurica*, *Cornus controversa*, *Betula platyphylla*, *Fraxinus mandshurica*.

베기는 ‘슈아베기 수익 - 슈아베기 비용’으로 계산하고, 모두베기는 ‘입목처분 수익 - 지존작업 및 조림 비용’으로 계산하였다(Table 4). 수익의 경우 원/m³ 단위로 계산하여 목재생산량을 곱하였고, 비용의 경우 원/ha로 계산하여 해당 벌채면적을 곱하였다.

탄소저장의 경제적 가치 계산에는 탄소배출권 외부사업 인증실적(Korea Offset Credits, KOC) 거래가격을 이용했으며, 2016년 6월부터 2021년 5월까지 5년 동안의 평균 가격인 27,738원/tCO₂를 적용하였다(Korea Exchange, 2021)

수원함양의 경제적 가치는 대체비용법을 이용하여 계산하였다. 수원함양량과 동일한 양의 물을 댐에 저장할 때 소요되는 비용을 수원함양의 경제적 가치로 계산하였으며, 단위 수원함양량 당 댐 건설 및 유지비용은 2018년 산림공익기능 평가에 사용된 값을 적용하였다(Kim et al., 2020).

이렇게 계산한 각 기능의 경제적 가치는 식 13의 순현재 가치 계산식을 이용하여 순현재가치로 환산하였다. 모든 경영활동은 분기의 중간 시점에 실행된다고 가정하여 순현재가치를 계산하였고, 이자율은 1.5%를 적용하였다.

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{V_t}{(1+i)^{(t-0.5)*10}} \quad (13)$$

V_t : t분기 경제적 가치, t : 해당분기, n : 최대분기, i : 이자율

3) 제약조건

제약조건은 일반적으로 제한된 자원, 외부적 규제, 목적함수에 포함되지 않은 기타 경영목표로 인해 발생한다(Davis et al., 2001). 본 연구는 총 7가지 제약조건을 선정하고, 가리산 선도산림경영단지 종합계획을 참고하여 제약조건의 기준값을 정하였다. 벌채 및 조림 면적(식 2)과 목재생산량 변화율(식 3)을 제외한 모든 제약조건은 현재 임분의 수종갱신이 완료되는 7분기 이후에 적용하였다.

(1) 벌채 및 조림 면적

산림경영계획 모델의 ModelIII는 의사결정변수의 지속기간이 갱신부터 모두베기 전까지만 유지된다. 즉, 모두베기 이후 해당 의사결정변수는 여러 개의 다른 의사결정변수로 나뉘거나 같은 시기에 모두베기 된 다른 변수들과 합쳐져서 새로운 의사결정변수로 변환된다. 일반적으로 산림경영계획 모델에서는 벌채 후 같은 분기 내에 조림하는 것을 가정한다. 따라서 식 2와 같이 p분기에 벌채되어 수종으로 갱신된 면적과 p분기에 조림된 수종의 면적이 동일하다는 제약조건이 필요하다.

(2) 분기별 목재생산량의 변화율

목재의 보속생산은 산림경영에 중요한 부분으로 분기별 목재생산량의 변화율을 제한함으로써 목재의 공급을 안정적으로 유도할 수 있다. 식 3에서 α, β 는 직전 분기 대비 현재 분기 목재생산량의 허용감소율과 허용증가율을 의미하며 각각 30%를 적용하였다.

(3) 영급별 면적 비율

산림의 영급별 면적은 대상지의 경제적·생태적 안정성을 위해 균형있게 분포되는 것이 바람직하다. 따라서 수식 모형에서 전체 면적 중 분기별로 각 영급이 차지하는 최소 비율을 설정할 수 있도록 제약조건을 구성하였다. 식 4에서 AC_{kp} 는 p분기 k영급의 면적, γ_{kp} 는 p분기 k영급의 최소 비율, $AREA$ 는 대상지의 면적을 의미한다. 영급별 면적 비율은 종합계획에 제시된 영급별 목표 면적을 고려하여 7분기 이후 1영급 15%, 2-6영급 각 10% 이상 분포하도록 설정하였다.

(4) 수종별 면적 비율

산림은 수종별로 성장속도와 탄소저장량, 수원함양력에 차이가 존재하기 때문에 수종별 비율을 조절하지 않으면 경영목적에 따라 특정 수종 위주로 갱신이 일어날 수 있

다. 또한 경영주체가 경관 관리, 임산물 생산, 병해충 관리 등의 목적으로 특정 수종을 늘리거나 줄이고자 할 수도 있다. 따라서 개발된 모델은 수종별 최소 비율과 최대 비율을 설정함으로써 수종 구성을 조절할 수 있도록 하였다. 식 5에서 A_{sp} 는 p분기 수종s의 면적, δ_{sp} 와 ϵ_{sp} 는 p분기 수종s의 최소 비율과 최대 비율을 의미한다. 수종별 최소 비율은 종합계획에 제시된 값을 적용하여 리기다소나무와 기타침엽수 20%, 낙엽송 35%, 전락활엽수 15%, 기타 활엽수 3% 이상 존재하도록 설정하였고, 잣나무는 최대 면적 비율을 17%로 제한하였다.

(5) 경영구역별 침엽수·활엽수 면적 비율

산림경영계획 수립 시 경영구역별로 세부 목표가 각기 다를 수 있다. 이러한 차이를 반영하기 위해 경영구역별로 침엽수와 활엽수의 비율을 설정할 수 있도록 하였다. 식 6은 침엽수 면적 제한에 관한 식으로, CA_{zp} 는 p분기 경영구역z 내 침엽수 면적, ζ_{zp} 와 η_{zp} 는 p분기 경영구역z 내 침엽수의 최소 비율과 최대 비율을 의미한다. 식 7은 활엽수 면적 제한에 관한 식이며, BA_{zp} 는 p분기 경영구역z 내 활엽수 면적, θ_{zp} 와 ι_{zp} 는 p분기 경영구역z 내 활엽수의 최소 비율과 최대 비율을 의미한다.

현재 가리산 선도산림경영단지는 활엽수의 조림을 확대할 것을 목표로 하고 있다. 이를 모델에 반영하고 임상이 단순화되는 것을 방지하기 위하여 경영구역별 침엽수와 활엽수의 최소 비율을 25%로 설정하였다. 또한 수원함양이 주기능으로 분류된 B구역의 경우 해당 기능을 증진할 수 있도록 활엽수 면적의 최소 비율을 50%로 설정하였다.

(6) 최소 목재생산량

목표 수확량은 분기별로 숲아베기 및 모두베기 수확량의 최소 수준을 설정함으로써 달성할 수 있다. 식 8은 숲아베기 수확량에 대한 제약식이다. VT_p 와 LVT_p 는 각각 p분기 숲아베기 수확량과 목표 숲아베기 수확량을 나타낸다. 식 9는 모두베기 수확량에 관한 식으로, VH_p 는 p분기 모두베기 수확량, $L VH_p$ 는 p분기 목표 모두베기 수확량을 의미한다. 종합계획에 제시된 목표에 따라 분기별 목표 숲아베기 수확량은 20,000 m³, 목표 모두베기 수확량은 150,000 m³를 적용하였다.

(7) 최소 목재판매액

최소 목재판매액을 제약조건으로 포함하여 분기별 목표 수익을 계획에 반영할 수 있도록 하였다. 식 10과 식 11은 각각 숲아베기 및 모두베기 목재판매액에 관한 제약조건을 나타낸다. TR_p 과 LTR_p 는 p분기 숲아베기 목재판매액과 목표 숲아베기 목재판매액, HR_p 과 LHR_p 는 p분기 모

Table 5. Weight combination of each management alternative.

Management alternative	W_t^a	W_c^b	W_w^c
1	1/3	1/3	1/3
2	1	0	0
3	0	1	0
4	0	0	1

^a W_t : Weight of timber production.

^b W_c : Weight of carbon storage.

^c W_w : Weight of water conservation.

두베기 목재판매액과 목표 모두베기 목재판매액을 의미한다. 종합계획 상의 목표를 적용하여 분기별 목표 숲아베기 수익은 12억원, 목표 모두베기 수익은 83억원을 기준으로 하였다.

5. 경영목적에 따른 최적 산림경영계획 분석

개발한 모델은 목적함수의 구성요소인 목재생산·탄소저장·수원함양에 대한 가중치를 조절하여 경영 목적을 변화시킬 수 있다. Table 5와 같이 서로 다른 경영 목적을 갖는 4개의 경영대안을 설정하고 각 대안의 최적 산림경영계획을 분석하였다. 이후 대안별 전체 계획기간의 총 목재생산량과 탄소저장량, 수원함양량, 각각의 순현재가치와 총 순현재가치를 비교함으로써 경영목적에 따른 산림경영 전략과 경영성과의 변화를 분석하고, 총 순현재가치가 가장 높은 대안에 대하여 시간에 따른 영급 구조의 변화를 예측하였다.

6. 목표 기능 간 상호작용 분석

1) 세 가지 기능의 상호작용

목재생산·탄소저장·수원함양 사이의 종합적인 관계를 파악하기 위하여 세 가지 기능의 가중치를 동시에 조절하면서 도출되는 경영계획과 성과를 비교하였다. 이를 위해 각 기능에 대한 가중치가 0을 초과하고 세 가지 기능에 대한 가중치의 합이 1이 되도록 하며, 각각의 가중치를 0.1 단위로 변화시키면서 가중치 조합을 구성하였다. 이후 각 조합의 최적 산림경영계획을 분석하여 조합별 목재생산·탄소저장·수원함양의 순현재가치를 나타내는 3차원 그래프를 작성하고 세 가지 기능 사이의 상호관계를 분석하였다.

2) 두 가지 기능의 상호작용

총 세 가지 기능 중 두 가지 기능을 고려할 때의 산림기능 간 관계를 파악하기 위하여 목적함수의 세 가지 가중치 중 하나를 0, 하나를 1로 고정하고, 다른 하나를 0에서 1까지 0.1 간격으로 변화시키면서 도출되는 경영계획과 성과

Table 6. Amounts of timber production, carbon storage, and water conservation attained in each management alternative.

Management alternative	Timber production (10,000 m ³)	Carbon storage (10,000 tCO ₂)	Water conservation (10,000 ton)
1	298 (100.0%)	848 (100.0%)	15,977 (100.0%)
2	299 (100.4%)	834 (98.3%)	15,932 (99.7%)
3	297 (99.7%)	850 (100.3%)	16,026 (100.3%)
4	298 (99.8%)	840 (99.1%)	16,043 (100.4%)

Table 7. NPV^a of timber production, carbon storage, and water conservation attained in each management alternative.

Management alternative	Timber production (billion won)	Carbon storage (billion won)	Water conservation (billion won)	Total (billion won)
1	47.8 (100.0%)	92.8 (100.0%)	59.8 (100.0%)	200.3 (100.0%)
2	48.1 (100.5%)	92.2 (99.4%)	59.7 (99.9%)	199.9 (99.8%)
3	45.5 (95.1%)	93.3 (100.6%)	60.0 (100.4%)	198.8 (99.2%)
4	44.7 (93.4%)	92.4 (99.6%)	60.1 (100.5%)	197.2 (98.4%)

^a NPV : Net Present Value.

를 분석하였다. 이를 위해 순현재가치를 이용하여 두 가지 기능들 사이의 결합생산가능곡선(Joint production possibility frontier)을 작성하고 상호관계를 분석하였다.

결과 및 고찰

1. 경영대안별 성과

Table 6과 Table 7은 기능별 가중치가 다른 대안들의 경영성과를 보여준다. Table 6은 전체 계획기간 동안의 목재 생산량, 탄소저장량, 수원함양량을 나타낸 것이며, Table 7은 각 기능별 순현재가치 및 총 순현재가치를 산출한 결과이다. 개별 기능에 대한 총량과 순현재가치는 각각 해당 기능의 최대화를 목적함수로 갖는 대안 2, 3, 4에서 가장

높았고, 세 가지 순현재가치를 합한 총 순현재가치는 세 가지 기능을 모두 고려한 대안 1에서 가장 높게 나타났다.

다만 대안 1의 경영성과를 기준(100%)으로 하여 다른 대안들의 상대적인 경영성과를 계산한 결과, 대안별 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 산림의 구조가 극단적으로 변화하는 것을 방지하기 위하여 제약조건에 이미 임상별·수종별·영급별 면적 등의 변화폭을 일정 수준으로 제한했기 때문이다. 하지만 대안별 목적에 따라 세부적인 경영전략에서는 차이가 발생했다.

Figure 3은 경영대안에 따른 전체 분기의 침엽수와 활엽수의 평균 면적 비율을 보여준다. 세 가지 기능별 가중치가 동일한 대안 1을 기준으로 대안 2의 경우 침엽수의 비율이 상대적으로 높게 나타났다. 목재생산만을 고려하는 대안

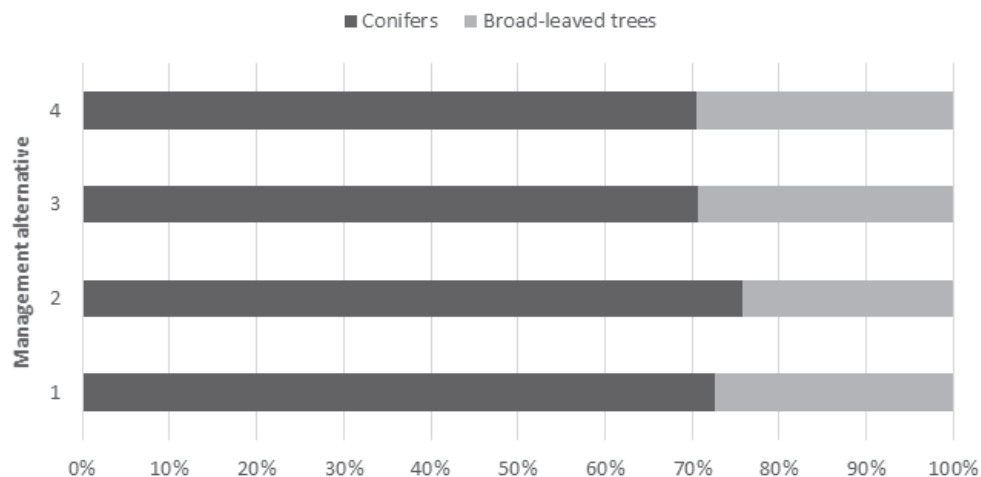


Figure 3. Percentage of average area of conifers and broad-leaved trees in each management alternative.

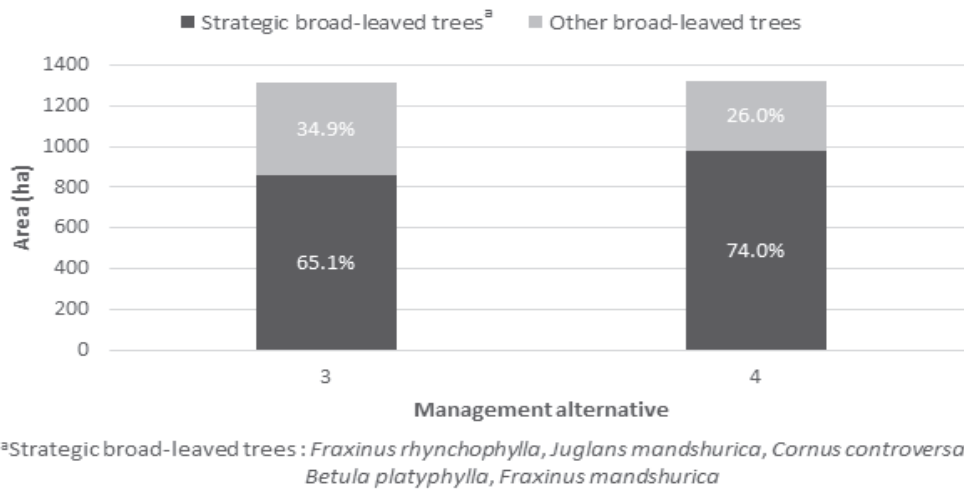


Figure 4. Average area of strategic and other broad-leaved trees in management alternative 3 and 4.

2의 경우 최대의 경영성과를 달성하기 위해 경제성이 상대적으로 우수한 침엽수의 면적을 넓혀 나갔기 때문이다.

한편 탄소저장 또는 수원함양을 각각 고려한 대안 3과 대안 4는 침엽수와 활엽수의 비율은 유사하게 나타났지만 활엽수 내 전략활엽수와 기타활엽수의 비율에서 차이를 보였다(Figure 4). 그 까닭은 기타활엽수의 탄소흡수력(탄소배출계수 2.70)이 전략활엽수의 탄소흡수력(탄소배출계수 2.52)에 비하여 높기 때문에 탄소저장을 증진하는 대안 3의 경우 기타활엽수의 면적이 상대적으로 증가한 반면, 수원함양의 가치를 최대화하는 대안 4의 경우에는 수원함양력이 더 높은 전략활엽수의 면적 비율이 증가하였기 때문이다.

2. 산림경영에 따른 영급 구조의 변화

총 순현재가치가 가장 높은 대안 1을 적용하여 산림을

관리할 경우, 시간에 따른 영급 분포가 Figure 5와 같이 변화하는 것으로 예측되었다. 현재 4영급 이상의 임분이 단지 면적의 대부분을 차지하고 있으나 계획적인 벌채와 갱신을 통하여 영급분포가 점차 균형을 이루는 모습을 보인다. 제약조건에서 설정한 목표에 맞추어 7분기 이후 영급 구조가 비교적 안정적으로 변화하며, 이에 따라 지속적인 목재의 생산이 가능할 것으로 예상된다. 대안 2-4에 따른 영급 구조의 변화도 이와 유사한 경향을 보이며 안정적으로 변화하는 것으로 나타났다.

3. 목표 기능 간 상호작용

1) 세 가지 기능의 상호작용

Figure 6은 세 가지 기능을 동시에 고려할 때 목재생산과 탄소저장, 수원함양 가치의 상호관계를 나타내는 3차원 그래프이다. 이 그래프를 보면 목재생산의 가치가 증가할

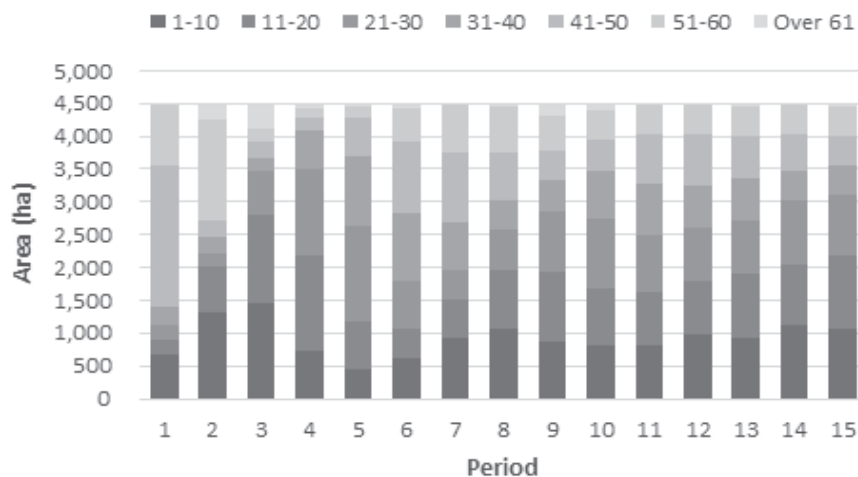


Figure 5. Changes of stand age distribution over time in management alternative 1.

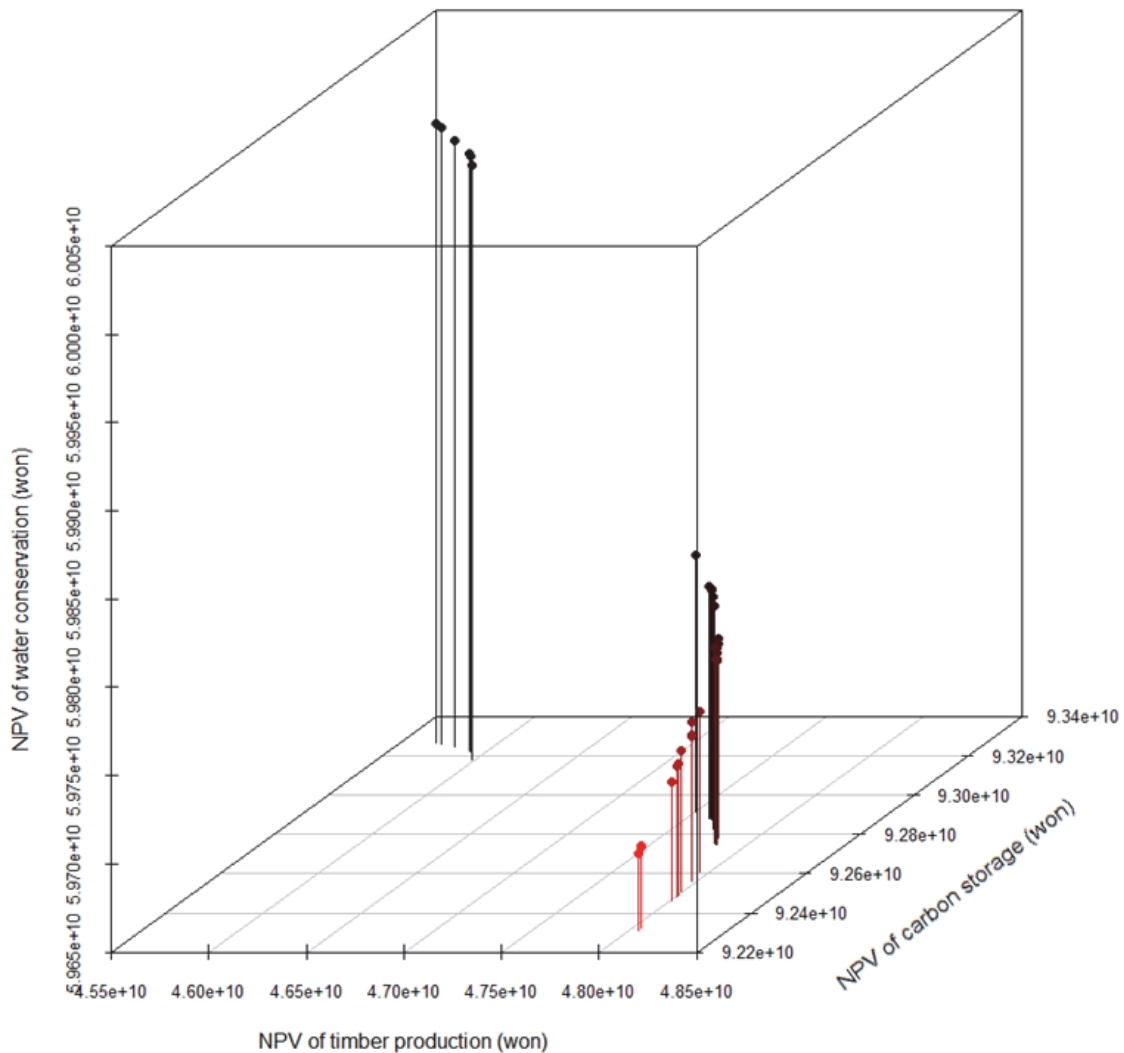


Figure 6. A 3-dimensional graph showing the interrelationship of forest functions when timber production, carbon storage and water conservation are considered simultaneously in a management alternative.

수목 탄소저장과 수원함양의 가치가 모두 감소하며, 반대로 탄소저장이나 수원함양의 가치가 증가하면 목재생산의 가치는 감소하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 목재생산은 탄소저장 및 수원함양과 상충관계에 있는 것으로 나타났다. 반면 탄소저장과 수원함양은 세 목적의 상호작용에서 서로 상승작용을 하였다.

이러한 관계 변화는 경영목적에 따른 산림의 임상구조 변화에 기인한다. 즉, 탄소저장의 중요도가 높아지면 목재생산의 중요도가 상대적으로 낮아지고 이에 따라 활엽수의 비율이 높아진다. 활엽수 면적의 증가는 수원함양 기능을 함께 증진시킨다. 수원함양의 중요도가 높아지는 경우에도 활엽수의 비율이 증가하므로 탄소저장 기능이 함께 증진되는 효과가 발생한다. 이와 같이 탄소저장과 수원함양을 증진하기 위한 산림경영 전략이 일치하기 때문에 두

가지 기능의 중요도 중 어느 하나가 증가하면 다른 하나의 기능 또한 증가하게 된다.

한편 Figure 6에서 그래프의 점들은 두 개의 군집으로 구분되는 양상을 보인다. 목재생산 가치가 낮고 탄소저장과 수원함양 가치가 높은 왼쪽 군집의 점들은 모두 목재생산의 가중치가 0.1인 점들이다. 반대로 오른쪽 군집의 점들은 목재생산의 가중치가 0.2 이상인 점들이다. 이처럼 목재생산의 가중치가 0.2에서 0.1로 변화할 때 목재생산의 가치가 급격히 감소하고 탄소저장과 수원함양의 가치가 커지는 경향이 나타났다.

2) 두 가지 기능의 상호작용

Figures 7-9는 각각 목재생산과 탄소저장, 목재생산과 수원함양, 탄소저장과 수원함양의 상대적인 관계를 나타

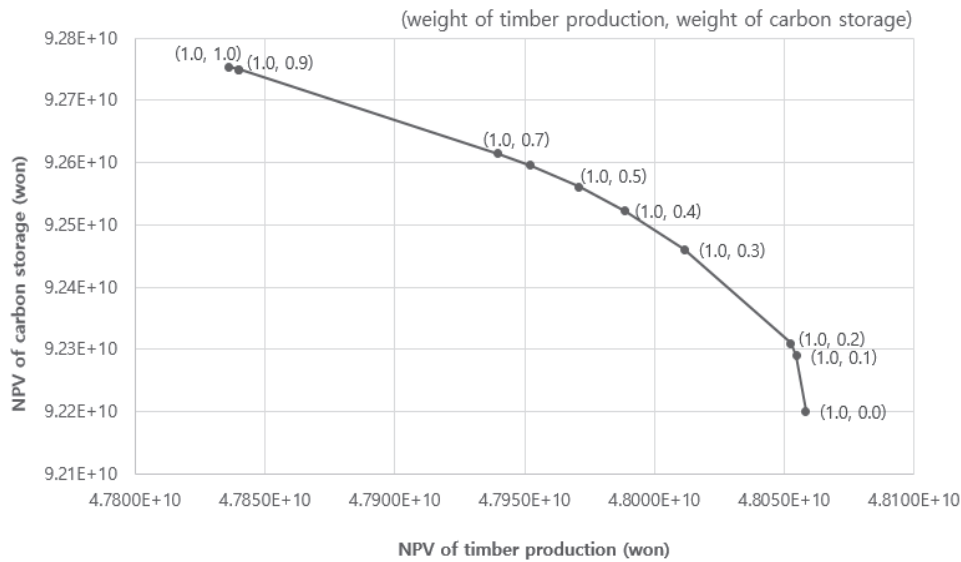


Figure 7. Joint production possibility frontier for timber production and carbon storage when the weight of water conservation is fixed to 0.0.

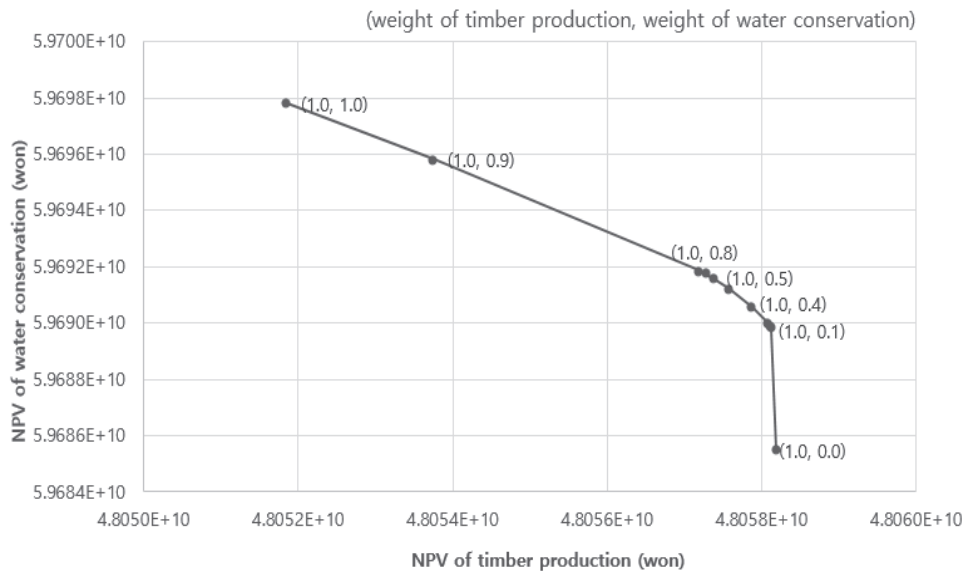


Figure 8. Joint production possibility frontier for timber production and water conservation when the weight of carbon storage is fixed to 0.0.

내는 결합생산가능곡선을 보여준다. 목재생산과 탄소저장, 목재생산과 수원함양, 탄소저장과 수원함양은 모두 어느 하나가 증가하면 다른 하나가 감소하는 상충관계를 보였다. 탄소저장과 수원함양의 경우 목재생산이 함께 고려되었을 때는 상승작용을 하였으나(Figure 6), 목재생산이 배제된 상태에서 두 가지 가치만을 고려하는 경우에는 서로 상쇄작용을 일으켰다(Figure 9). 이는 목재생산을 고려하지 않는 경우, 탄소저장과 수원함양 기능 사이 경쟁에 의하여 전략활엽수와 기타활엽수의 면적이 변화하였기

때문이다.

가중치 변화에 따른 목재생산 가치와 탄소저장 가치의 변화는 비교적 점진적으로 일어났으나(Figure 7), 목재생산 가치 또는 탄소저장 가치가 증가할 때 수원함양 가치가 변화하는 속도는 특정 지점에서 급격하게 변화하는 경향이 나타났다(Figures 8-9). 특히 수원함양의 가중치가 0으로 전혀 고려되지 않는다면 그로 인해 얻을 수 있는 다른 가치의 증가에 비해 수원함양 가치의 감소가 상대적으로 크게 나타났다.

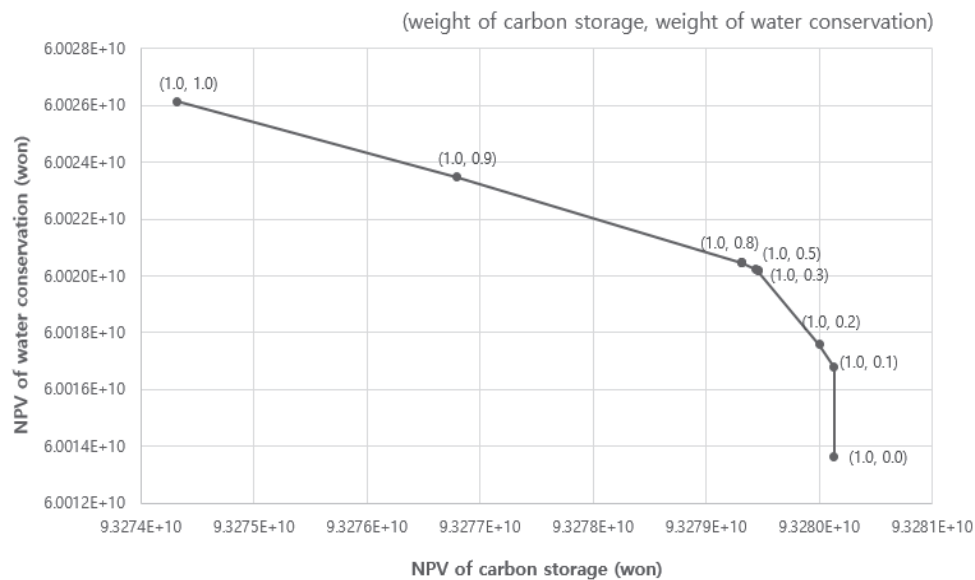


Figure 9. Joint production possibility frontier for carbon storage and water conservation when the weight of timber production is fixed to 0.0.

결론

산림에 대한 수요가 다양해지고 산림경영 문제가 복잡해지면서 산림의 여러 가지 기능을 종합적으로 고려하는 산림경영의 중요성이 커지고 있다. 본 연구는 목재생산과 탄소저장, 수원함양의 세 가지 기능을 중심으로 가리산 선도산림경영단지의 경영조건에 따른 최적 산림경영계획 및 경영성과를 예측함으로써 경영목적별 경관수준의 산림 변화와 각 기능들 사이의 관계를 분석하였다. 이를 위해 MOLP를 이용하여 가리산 단지의 세 가지 산림기능을 최적으로 관리하기 위한 산림경영계획 모델을 개발하였다.

개발한 모델에서 목적함수의 가중치를 조절함으로써 경영목적이 다른 네 가지 경영대안을 비교한 결과, 계획기간 동안 예상되는 총 순현재가치는 한 가지 기능만을 최대화하는 대안보다 세 가지 기능의 종합적 가치를 최대화하는 대안에서 가장 높게 나타났다. 특히 목재생산의 가중치가 높은 경우에는 경제적 가치가 상대적으로 높은 침엽수의 면적이 증가하였고, 탄소저장과 수원함양의 가중치가 높은 경우에는 탄소저장 및 수원함양 기능이 상대적으로 높은 활엽수의 면적이 증가하였다. 다만 제약조건의 설정으로 인하여 대안별 경영성과의 차이가 크지 않았으며, 적용한 대안에 따라 산림을 관리함으로써 보속생산을 위한 장기적인 영급 구조의 개선이 가능함을 확인하였다.

또한 개별 기능 사이의 상호관계를 분석한 결과, 세 가지 기능이 동시에 작용할 때 목재생산 기능은 탄소저장 및 수원함양과 상쇄작용을 하였고, 탄소저장과 수원함양은 서로 상승작용을 하였다. 반면 두 가지 기능만 작용하

는 경우에는 목재생산과 탄소저장, 목재생산과 수원함양, 탄소저장과 수원함양 모두 서로 상쇄작용을 하였다.

따라서 가리산 선도산림경영단지의 경제적·공익적 가치를 높이기 위해서는 한두 가지 기능보다는 목재생산과 탄소저장, 수원함양 기능을 모두 고르게 고려하는 것이 유리한 것으로 나타났다. 하지만 경영목적에 따른 성과의 차이가 크지 않으므로 산림의 가치를 크게 변화시키지 않는 범위 내에서 임상과 수종 등을 적절하게 선택함으로써 경영목적에 맞는 산림관리가 가능할 것으로 판단된다. 이와 같은 경관수준의 산림관리는 선도산림경영단지와 같이 대면적 산림의 다양한 기능이 지속적으로 유지·증진될 수 있는 대안을 제시할 수 있으며 현장 적용성을 높이기 위한 후속 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 산림청(한국임업진흥원) 산림과학기술 연구개발사업(2018113C10-2020-BB01 & 2021314B10-2122-AA03)의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

References

- Bae, J.S., Chang, C.Y., Oh, M.K. and Choi, G.Y. 2017. 2030 Key issue in forest and forestry. Korea Forest Research Institute. Seoul, Korea. pp. 247.
- Bae, S.W., Lee, K.J., Lee, K.S., Hwang, J.H., Kim, K.H., Youn, H.J. and Kim, H.S. 2008. Prescriptions by main forest

- function. Korea Forest Research Institute. Seoul, Korea. pp. 189.
- Bae, S.W., Park, Y.G., Lee, K.J., Lee, S.T., Jeong, J.M., Park, J.H., Jang, S.C. and Seo, K.W. 2012. Management system and management plan for protection forest. Korea Forest Research Institute. Seoul, Korea. pp. 189.
- Bettinger, P., Boston, K., Siry, J.P. and Grebner, D.L. 2009. Forest management and planning. Academic Press. Amsterdam, Netherlands. pp. 331.
- Davis, L.S., Johnson, K.N., Bettinger, P.S. and Howard, T.E. 2001. Forest management: To sustainable ecological, economic, and social values (4th ed). McGraw-Hil. New York, U.S.A. pp. 804.
- Han, H., Kwon, K.B., Chung, H.J., Seol, A.R. and Chung, J.S. 2015. Analysis of optimal thinning prescriptions for a cryptomeria japonica stand using dynamic programming. *Journal of Korean Forest Society* 104(4): 649-656.
- Hjortsø, C.N. and Straede, S. 2001. Strategic multiple-use forest planning in Lithuania – applying multi-criteria decision-making and scenario analysis for decision support in an economy in transition. *Forest Policy and Economics* 3(3-4): 175-188.
- Hongcheon National Forest Station. 2019. The first comprehensive plan of Mt.Gari leading forest management zone (2019~2068). Hongcheon, Korea. pp. 52.
- Kang, J.T. et al. 2018. The table of the stem volume, biomass, and yield. Korea Forest Research Institute. Seoul, Korea. pp. 221.
- Kim, J.H., Kim, K.D., Kim, R.H., Youn, H.J., Lee, S.W., Choi, H.T., Kim, J.J. and Park, C.R. 2010. A Study on the estimation and the evaluation methods of public function of forest. Korea Forest Research Institute. Seoul, Korea. pp. 205.
- Kim, K.D., Bae, J.S., Yim, J.S., Han, H., Lee, S.J., Choi, H.T., Lee, C.W., Lee, C.H., Kim, R.H., Park, C.R., Choi, S.M., Jang, Y.S., Jeon, C.H. and Park, S.J. 2020. The results of the evaluation of forest public function and the implication – 2018 –. Korea Forest Research Institute. Seoul, Korea. pp. 23.
- Korea Forest Service. 2016. 2030 Forest carbon management strategy. Daejeon, Korea. pp. 21.
- Korea Forest Service. 2020. Sustainable forest management guideline. Daejeon, Korea. pp. 64.
- Korea Exchange. 2021. Daily information for market price of carbon credit (type:KOC). <https://ets.krx.co.kr/contents/ETS/03/03010000/ETS03010000.jsp>. (2021. 05. 31).
- K-water. 2021. 2021 Water and future. Daejeon, Korea. pp. 459.
- Leading Forest Management Zone. 2021. Introduction of leading forest management zone – Basic Direction. <http://www.sundofm.or.kr/page.php?idx=15>. (2016. 07. 01).
- Park, E.S. and Chung, J.S. 2000. Optimal forest management planning for carbon storage and timber production using multiobjective linear programming. *Journal of Korean Forest Society* 89(3): 335-341.
- Roise, J.P., Chung, J., Lanical, R. and Lennartz, M. 1990. Red-cockaded woodpecker habitat and timber management: Production possibilities. *Southern Journal of Applied Forestry* 14(1): 6-12.
- Seol, A.R. 2014. Development of a decision-making model for timber and wildbirds Habitat management in Jeju experimental forest. (Dissertation). Seoul. Seoul National University.
- Son, Y.M., Kim, R.H., Lee, K.H., Pyo, J.K., Kim, S.W., Hwang, J.S., Lee, S.J. and Park, H. 2014. Carbon emission factors and biomass allometric equations by Korean main species. Korea Forest Research Institute. Seoul, Korea. pp. 97.

Manuscript Received : July 22, 2021

First Revision : September 8, 2021

Second Revision : October 5, 2021

Accepted : October 6, 2021