

## 多目的 山林經營計劃을 위한 線型計劃法의 應用<sup>1\*</sup>

朴恩植<sup>2</sup> · 鄭主相<sup>2</sup>

# An Application of Linear Programming to Multiple-Use Forest Management Planning<sup>1\*</sup>

Eun Sik Park<sup>2</sup> and Joo Sang Chung<sup>2</sup>

### 요 약

이 연구에서는 춘천국유림관리소 관할인 가리산 일대의 산림을 대상으로 다목적 산림경영을 추구하기 위하여 최적수확계획의 수립에 선형계획법을 적용하였다. 지리적 특성에 따라 연구대상지역을 4개의 경영단위 또는 유역으로 구분하였으며, 비감소수확, 현존 임분의 갱신시기, % 수확면적, 토사유출량, 목재생산량, 탄소저장량을 조절하기 위한 제약조건을 포함하였으며, 계획기간말의 임상구조 및 임분 갱신을 위한 수종선택 조건을 경영단위별로 적용하였다. 선형계획문제의 수식화에는 모델 I 과 모델 II를 적용하였으며, 수식모형과 경영대안에 따라 최적해들을 비교검토하였다.

### ABSTRACT

In this study, linear programming (LP) was applied to solving for optimal harvesting schedules of multiple-use forest management in Mt. Kari area managed by Chunchun National Forest Station. Associated with the geographic characteristics, the study area was classified into 4 large management units or watersheds and simultaneously applied were the site-specific levels of management constraints : nondeclining yield, initial cut for existing stands, % cut area, the volume of soil erosion, timber production and carbon storage, ending inventory condition and % area species selection for regeneration. The problem was formulated using both Model I and Model II techniques. In this paper, the formulations are presented and the results of the optimal solutions are discussed for comparison purposes.

*Key words : linear programming, optimal harvesting schedules, multiple-use forest management, Model I, Model II*

### 서 론

성공적인 산림경영을 위해서는 산림자원에 대한 정확한 정보와 과학적인 의사결정 그리고 체계적인 사업이 요구된다. 특히, 산림은 생육기간이 길고, 입지 환경에 많은 영향을 받는 생물자원이므로 산림경영에 고려해야 하는 요소들이 매우 많은 특징을 갖는다. 최근에는 산림자원의 환경적 가치에 대한 관심이 증가하면서 이러한 요소들을 산림경영계획의 수립과정에 효과적으로

반영하기 위한 노력들이 활발히 전개되고 있다. 일례로 컴퓨터를 활용한 정보분석과 계획수립은 이미 많은 분야에서 일반화되고 있으며, 산림경영에도 폭넓게 이용되고 있다.

산림경영문제의 수식모형은 의사결정변수의 정의 방법에 따라 Model I 과 Model II로 구분할 수 있는데(Johnson과 Scheurman, 1977), Model I에서는 현존 임분의 각 분기별 벌채면적을 전체 경영계획기간 동안 동일한 경영단위로 정의하는 반면, Model II에서는 동일 분기에 벌채되는

<sup>1</sup> 接受 1999年 3月 15日 Received on March 15, 1999.

<sup>2</sup> 서울대학교 산림자원학과 Department of Forest Resources, Seoul National University, Suwon 441-744, Korea.

\* 본 연구는 농림수산기술개발사업(97-3035) 지원에 의한 연구의 일부임.

지역을 새로운 경영단위로 정의한다. 이러한 수식모형은 대개 목적함수로 재적생산량이나 현재 가치 등을 이용하며, 재적생산, 벌채면적 등과 관련된 제약조건을 포함하고 있다. 지금까지 발표된 관련 연구 역시 수식유형에 따라 이 두 가지 형태로 구분할 수 있으며, Johnson 등(1986)과 박은식(1998)은 두 가지 수식유형을 모두 포함하는 모델을 개발하기도 하였다.

한편 국내에서는 우종춘(1991), 정주상과 박은식(1993) 등이 선형계획법을 이용한 산림경영모형을 개발하였는데, 이들 모형의 수식모형은 재적생산 중심의 산림수확조절에 초점을 맞추고 있으며, 환경적 인자들에 대한 고려가 상대적으로 미약했던 것이 사실이다. 따라서 이 연구에서는 경제적, 환경적 측면을 함께 고려한 선형계획 수식모형을 구성하고, 이를 이용한 산림경영계획의

수립과 분석을 목적으로 하였다.

수식모형의 구성

1. 목적함수와 제약조건

먼저 산림경영방침으로 보속경영체계의 유도, 사업에 따른 환경피해의 최소화 및 산림환경기능의 보전 등을 선정하였다. 이에 따라 목적함수로는 기존의 선형계획 수식모형에서 많이 사용되는 재적생산량 극대화를 목적함수로 채택하였으며, 비감소수확(nondeclining yield), 재적생산량조절, 벌채면적조절, 토사유출량조절, 갱신수종의 다양성 확보, 탄소저장량조절, 계획기간말의 영급구조조절 등을 제약조건에 포함시켜 산림환경인자들을 충분히 고려할 수 있도록 하였다(Table 1).

Table 1. Model I and Model II formulations

Model I	Model II
$Max Z = \sum_i \sum_j \sum_k \sum_l \sum_m c_{ijklm} \cdot X_{ijklm}$	$Max Z = \sum_i \sum_j \sum_k \sum_l \sum_m c_{ijklm} \cdot X_{ijklm}$
<p>subject to</p> $\sum_m X_{ijklm} = A_{ijkl} \quad \forall i, j, k, l$ $\sum_i \sum_j \sum_k \sum_l \sum_m v h_{ijklmp} \cdot X_{ijklm} - V H_p = 0 \quad \forall p$ $\sum_i \sum_j \sum_k \sum_l \sum_m v t_{ijklmp} \cdot X_{ijklm} - V T_p = 0 \quad \forall p$ $\sum_i \sum_j \sum_k \sum_l \sum_m c s_{ijklmp} \cdot X_{ijklm} - C S_p = 0 \quad \forall p$ $\sum_k \sum_l \sum_{m \in M_p} X_{ijklm} - C A_{ijp} = 0 \quad \forall i, j, p$ $\sum_j \sum_k \sum_l \sum_{m \in E_A} X_{ijklm} - E A_{ia} = 0 \quad \forall i, a$ $V H_p + V T_p - V S_p = 0 \quad \forall p$ $\sum_j C A_{ijp} \leq c p_i \cdot Z A_i \quad \forall i, p$ $\sum_j C A_{ijp} \cdot s e \leq G S_i \quad \forall i, p$ $V S_p \geq G V_p \quad \forall p$ $V S_p - (1 - \alpha) \cdot V S_{p-1} \geq 0 \quad p = 2, 3, \dots, n.$ $V S_p - (1 + \beta) \cdot V S_{p-1} \leq 0 \quad p = 2, 3, \dots, n.$ $C S_p \geq G C_p \quad \forall p$ $C B_p \leq G B_p \quad \forall p$ $\sum_j E A_{ia} \geq G A_a \quad \forall a$ $X_{ijklm} \geq 0 \quad \forall i, j, k, l, m$	<p>subject to</p> $\sum_m X_{ijklm} = A_{ijkl} \quad \forall i, j, k, l$ $\sum_i \sum_j \sum_k \sum_l \sum_m v h_{ijklmp} \cdot X_{ijklm} - V H_p = 0 \quad \forall p$ $\sum_i \sum_j \sum_k \sum_l \sum_m v t_{ijklmp} \cdot X_{ijklm} - V T_p = 0 \quad \forall p$ $\sum_i \sum_j \sum_k \sum_l \sum_m c s_{ijklmp} \cdot X_{ijklm} - C S_p = 0 \quad \forall p$ $\sum_k \sum_l \sum_j X_{ijklm} - C A_{ijm} = 0 \quad \forall i, j, m$ $\sum_k \sum_m X_{ijklm} - C A_{ijt} = 0 \quad \forall i, j, l$ $\sum_j \sum_m X_{ijklm} - P A_{ikl} = 0 \quad \forall i, k, l$ $\sum_j \sum_k \sum_l \sum_{m \in E_A} X_{ijklm} - E A_{ia} = 0 \quad \forall i, a$ $V H_p + V T_p - V S_p = 0 \quad \forall p$ $\sum_j C A_{ijp} \leq c p_i \cdot Z A_i \quad \forall i, p$ $\sum_j C A_{ijp} \cdot s e \leq G S_i \quad \forall i, p$ $P A_{ikp} - m r_k \cdot \sum_j C A_{ijp} \geq 0 \quad \forall i, k, p$ $V S_p \geq G V_p \quad \forall p$ $V S_p - (1 - \alpha) \cdot V S_{p-1} \geq 0 \quad p = 2, 3, \dots, n.$ $V S_p - (1 + \beta) \cdot V S_{p-1} \leq 0 \quad p = 2, 3, \dots, n.$ $C S_p \geq G C_p \quad \forall p$ $C B_p \leq G B_p \quad \forall p$ $\sum_j E A_{ia} \geq G A_a \quad \forall a$ $X_{ijklm} \geq 0 \quad \forall i, j, k, l, m$

Table 1. Continue

Model I		Model II	
$X_{ijklm}$	= area in hectares for management zone i, site quality index j, species k, age class l, management regime m.	$X_{ijklm}$	= area in hectares for management zone i, site quality index j, species k, planting period l, cutting period m.
$U_{ijklmp}$	= harvest volume per hectare in cubic meters for management zone i, site quality index j, species k, age class l, management regime m at period p.	$U_{ijklmp}$	= harvest volume per hectare in cubic meters for management zone i, site quality index j, species k, planting period l, cutting period m at period p.
$U_{ijklmp}$	= thinning volume per hectare in cubic meters for management zone i, site quality index j, species k, age class l, management regime m at period p.	$U_{ijklmp}$	= thinning volume per hectare in cubic meters for management zone i, site quality index j, species k, planting period l, cutting period m at period p.
$CS_{ijklmp}$	= carbon storage per hectare in tons for management zone i, site quality index j, species k, age class l, management regime m at period p.	$CS_{ijklmp}$	= carbon storage per hectare in tons for management zone i, site quality index j, species k, planting period l, cutting period m at period p.
$C_{ijklm}$ = objective function coefficients for the corresponding subscripts.			
$A_{ijkl}$ = area in hectares for management zone i, site quality index j, species k, age class l.			
$CA_{ijp}$ = harvesting area in hectares for management zone i, site quality index j, period p.			
$PA_{ijl}$ = planting area in hectares for management zone i, site quality index j, period l.			
$EA_{ia}$ = area in hectares for management zone i, age class a at the ending period.			
$M_p$ = the set of management regime harvested in period p. $n$ = number of periods.			
$E_A$ = the set of decision variable which is included age class a at the ending period.			
$GA_{ia}$ = lower bound of area in hectares for management zone i, age class a at the ending period.			
$VH_p$ = volume harvested at period p.		$VT_p$ = volume thinned at period p.	
$VS_p$ = total production volume at period p.		$ZA_i$ = area in hectares for management zone i.	
$CS_p$ = carbon storage at period p.		$CB_p$ = total cost in period p.	
$GB_p$ = upper bound of budget at period p.		$GC_p$ = minimum carbon storage required at period p.	
$GV_p$ = minimum production required at period p.		$cp_i$ = allowable cutting rate in management zone i.	
$se$ = soil erosion per hectares in cutting period.		$mr_k$ = minimum regeneration rate for species k.	
$\alpha$ = allowable decreasing rate in production.		$\beta$ = allowable increasing rate in production.	

2. 수식모형의 주요 함수

수종별 성장함수의 경우 지금까지 국내에서 발표된 수확표들은 대부분 유령림 자료를 바탕으로 조제된 것이므로 예측기간이 짧고, 임령의 증가에 따른 생장의 둔화를 적절하게 반영하지 못하는 문제점을 내포하고 있다. 결국 기존의 수확표는 장별기 산림경영의 성장함수로 적합하지 않기 때문에 Table 2와 같은 수정 성장함수(임업연구원, 1996)를 이용하였다.

산림의 탄소저장량은 임지(식생+토양+분해물) 탄소량과 임산물 탄소량의 합(임업연구원, 1994a)으로 계산할 수 있으며, 그 양은 산림경영 형태에 따라 달라질 수 있다. 이 연구에서는 영속적인 산림경영을 전제로 수식모형을 구성하였기 때문에 산림경영활동의 영향을 받는 수간부분의 탄소저장량만을 고려하였다. 탄소저장량의 추정은 임분생장에 따른 바이오매스의 증가량을 계산하고, 이를 토대로 탄소저장량을 추정하였다. 즉, 수종별 성장함수로부터 얻어지는 재적량과 전전

비중을 이용하여 수간부와 지상부, 그리고 임분 전체 바이오매스를 계산하였으며, 바이오매스량에 탄소전환인자를 곱하여 임분에 저장된 탄소량을 추정하였다. 여기서 전전비중은 각 수종별 자료(임업연구원, 1994b)를 이용하였으나 각 부위별 바이오매스 비율은 침엽수와 활엽수로 구분하여 침엽수는 잣나무, 활엽수는 상수리나무의 값을 적용하였다.

산지사면의 침식에 따른 토사유출량은 토양의 용적밀도, 강수의 표면유출량, 단위강우량, 식생 피복도 등에 영향을 받는다(박재현, 1995). 그러나 이러한 인자들이 토사유출량에 미치는 영향에 대한 국내 연구결과가 미비하여 수식모형에 함수형태로 반영하기는 어려운 실정이므로 서울대학교 남부연습림(전남 광양 소재)에서 실시된 연구결과(박재현, 1995)를 이용하여 토사유출량을 추정하였다. 이 연구에 따르면 유출계수 0.4를 적용하였을 경우 연간 토사유출량은 벌채지에서는 벌채당년도에는 0.127톤/ha, 벌채 다음 해에는

Table 2. Growth-and-yield function by species

Species	Parameters			Equation form
	a	b	c	
<i>P. densiflora</i> (for. <i>erecta</i> )	307.816	0.060	3.114	$V = a(1 - e^{-bT})^c$
<i>P. densiflora</i>	246.030	0.054	3.795	"
<i>P. koraiensis</i>	339.690	0.047	2.654	"
<i>Larix</i> spp.	426.363	0.044	2.103	"
<i>P. rigida</i>	422.999	3.983	0.053	$V = a e^{-b} e^{-cT}$
<i>Cryptomeria</i> spp.	341.400	1.287	0.058	$V = a e^{-b} e^{-cT}$
<i>Chamaecyparis</i> spp.	263.640	1.210	0.060	"
<i>Quercus acutissima</i>	391.583	0.029	2.020	$V = a(1 - e^{-bT})^c$
<i>Quercus mongolica</i>	256.941	0.040	2.013	"
<i>Populus</i> spp.	348.739	1.818	0.175	$V = a e^{-b} e^{-cT}$

V : stand volume per unit area(m<sup>3</sup>/ha), T : stand age

Table 3. Carbon storage rate by species

Species	Specific gravity oven-dried(dm/m <sup>3</sup> )	Biomass conversion rate		Conversion factor	Carbon storage rate
		Stem	Root		
<i>P. densiflora</i> (for. <i>erecta</i> )	0.44	1.59	1.22	0.5	0.43
<i>P. densiflora</i>	0.44	1.59	1.22	0.5	0.43
<i>P. koraiensis</i>	0.43	1.74	1.22	0.5	0.46
<i>Larix</i> spp.	0.56	1.22	1.22	0.5	0.42
<i>P. rigida</i>	0.49	1.44	1.22	0.5	0.43
<i>Cryptomeria</i> spp.	0.41	1.26	1.22	0.5	0.32
<i>Chamaecyparis</i> spp.	0.45	1.28	1.22	0.5	0.35
<i>Quercus acutissima</i>	0.80	1.33	1.31	0.5	0.70
<i>Quercus mongolica</i>	0.78	1.31	1.31	0.5	0.67
<i>Populus</i> spp.	0.33	1.33	1.31	0.5	0.29

0.023톤/ha, 비벌채지에서는 0.003톤/ha로 나타났다. 따라서 벌채지의 토사유출은 벌채당년도와 벌채 이듬해에 증가하였다가 3년후부터는 식생의 피복 등으로 비벌채지와 같아지는 것으로 가정하여 토사유출량( $SE_i = 0.174X_{Ci} + 0.030X_{Ei}$ ,  $SE_i$ : *i* 분기의 토사유출량,  $X_{Ci}$ : 벌채지 면적,  $X_{Ei}$ : 비벌채지 면적)을 계산하였다.

## 모델의 적용

### 1. 연구대상지

사례분석을 위해 춘천관리소의 춘천영림구 가리산 지역을 연구대상지로 선정하였으며, 자료는 해당 영림구의 6차기 산림조사부, 임소반도 등을 이용하였다. 분석에 앞서 대상 지역의 입지특성이나 임상조건을 경영계획에 반영할 수 있도록 연구대상지를 유역에 따라 4개의 경영구역으로

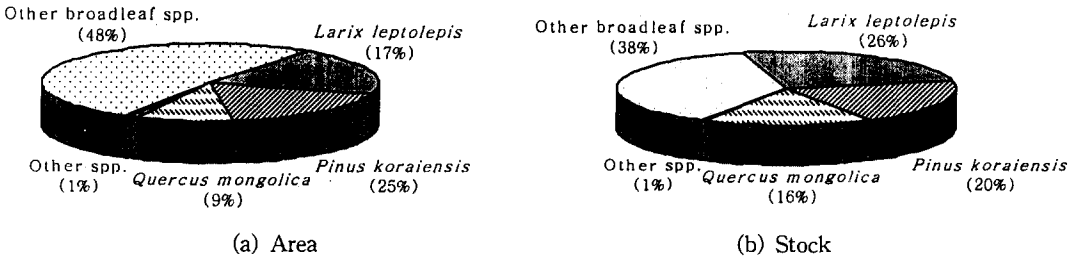
세분하였다.

Table 4는 산림조사자료를 기초로 4개 경영구역에 대한 임상 현황을 요약한 것이다. 영급구성은 II, IV영급이 각각 전체 면적의 29%를 차지하였으며, V영급은 2.6%에 불과하였다. 전체적으로는 II, III, IV영급이 각각 1,300ha 내외의 비교적 고른 분포를 보였다. 경영구역별로는 1구역과 2구역의 경우 III영급 이상이 구역 면적의 각각 71%와 60%를 차지하였으며, ha당 축적 역시 58.7m<sup>3</sup>/ha와 43.9m<sup>3</sup>/ha로 전체 평균보다 높았다. 반면 3, 4구역은 II영급 이하의 면적이 34%와 59%였으며, ha당 축적도 각각 39.69m<sup>3</sup>/ha와 32.9m<sup>3</sup>/ha로 1, 2구역보다 낮았다.

Fig. 1은 대상 지역의 수종 구성 내용을 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 굴참나무 및 기타 활엽수가 전체 면적의 48%, 축적의 38%를 차지하여 가장 많았으며, 다음으로는 잣나무, 낙엽

**Table 4.** Inventory data by age class

Zone	Age class	Age class					Total	Stock (m <sup>3</sup> /ha)
		I	II	III	IV	V		
1	area (ha)	39	265	244	426	89	1,063	58.7
	stock (m <sup>3</sup> )	—	9,238	30,153	16,073	6,916	62,380	
2	area (ha)	124	393	344	443	14	1,318	43.9
	stock (m <sup>3</sup> )	—	21,209	17,381	18,105	1,120	57,815	
3	area (ha)	210	108	319	297	15	949	39.6
	stock (m <sup>3</sup> )	10,181	3,378	12,292	10,289	1,395	37,535	
4	area (ha)	114	545	316	143	—	1,118	32.9
	stock (m <sup>3</sup> )	125	16,039	16,390	4,174	—	36,728	
Total	area (ha)	487	1,311	1,223	1,309	118	4,448	43.7
	stock (m <sup>3</sup> )	10,306	49,864	76,216	48,641	9,431	194,458	



**Fig. 1.** Forest inventory by species

송, 신갈나무 등의 순서로 나타났다. 그리고 기타 수종으로는 물푸레나무, 자작나무, 잣나무 등이 있으나 전체 면적의 1%에 불과하였다.

**2. 경영대안의 구성**

수학적으로 주어진 산림경영문제에 적용 가능한 대안들은 무수히 많이 존재하지만 단순히 많은 수의 대안보다는 경영자의 의도를 적절하게 반영할 수 있는 대안의 개발이 중요하다. 이 연구에서는 수식유형과 제약정도에 따라 Table 5와 같은 4가지 경영대안을 구성하고, 각 대안별로 최적해를 계산하고, 그 결과를 비교, 분석하였다.

대안의 구성에 앞서 경영계획기간은 최소한 2회 이상의 갱신이 가능하도록 10년 단위 20분기를 적용하였다. 그리고 모든 경영활동은 각 분기 말에 이루어지며, 임분은 벌채와 동시에 조림하는 것을 전제로 하였다. 수종별 벌기령은 영림계획운영요강(산림청, 1995)에서 제시하는 벌기령(요존국유림) 이상으로 제한하였으며, 수종별로는 소나무, 잣나무, 편백은 70년, 낙엽송, 삼나무는 60년, 리기다소나무는 40년, 포플러류는 20

년을 하한선으로 설정하였다. 리기다소나무와 포플러류의 경우 운영요강에는 벌기령이 각각 35년과 15년으로 되어 있으나 분기의 단위를 10년으로 설정하였으므로 벌기령을 40년과 20년으로 연장하여 적용하였다.

**결과 및 고찰**

**1. 최적경영안의 비교**

Table 6은 대안별로 재적생산량 합계와 탄소저장량 합계를 비교한 것이다. 동일한 제약조건을 적용하고, 수식유형을 달리한 대안 A와 B를 비교하면 재적생산량은 B, 탄소저장량은 A가 더 높은 값을 보였다. 이는 수식유형의 특성상 제약조건이 동일할 경우 Model I에서는 현존 수종의 지속적인 유지를 전제로 하는 반면, Model II에서는 현존 수종의 변경이 가능하여 최적화 과정에서 고려할 수 있는 해의 범위가 상대적으로 넓기 때문이다. 그리고 탄소저장량은 수종의 종류나 갱신시기에 의해 결정되므로 수종별 갱신비율을 제한한 대안 B가 상대적으로 강한 제약조건이 적용되었기 때문이다.

**Table 5.** Scenarios based on formulation types and scenarios under intensities of constraints

Scenarios		A	B	C	D
Formulation type		I	II	II	II
Rotation age	zone 1, 2, 4	base*	base*	base*	base*
	zone 3	base + 20	base + 20	base + 20	base + 20
Initial cut for existing stands	zone 1, 2	< 10th period	< 10th period	< 10th period	< 10th period
	zone 3, 4	-	-	-	-
Nondeclining yield	$\alpha^{**}$	0%	0%	0%	< 10%
	$\beta^{**}$	-	-	-	-
% cut area by zone	zone 1, 2	< 20%	< 20%	< 20%	< 15%
	zone 3	< 15%	< 15%	< 12%	< 5%
	zone 4	< 5%	< 5%	< 3%	< 1%
Soil erosion (ton/ha)/yr	zone 1, 2	< 0.05	< 0.05	< 0.03	< 0.03
	zone 3	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02
	zone 4	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Timber production in each period(m <sup>3</sup> )	after 10th period	> 200,000	> 200,000	> 200,000	> 150,000
Carbon storage in each period (t/ha)	after 10th period	> 350,000	> 350,000	> 400,000	> 500,000
Ending inventory (for each age class of I through VI)	zone 1, 2	> 100ha	> 100ha	> 100ha	> 100ha
	zone 3	> 100ha	> 100ha	> 100ha	> 30ha
	zone 4	-	-	-	-
% area of spp. chosen for regeneration	zone 1, 2	-	5%~30%	5%~30%	5%~30%
	zone 3	-	5%~20%	5%~20%	5%~20%
	zone 4	-	-	-	-

\* The minimum rotation by species following the guideline issued by the Korean Forestry Administration.

\*\* See Table 1.

**Table 6.** The difference in timber production and carbon storage of scenarios

Scenarios	A	B	C	D
Timber production(1,000m <sup>3</sup> )	3,553	4,187	3,914	3,018
Carbon storage(1,000ton)	10,273	8,546	9,167	10,709

제약강도에 따라서는 재적생산량의 경우 대안 B, C, D 순으로 나타났으며, 탄소저장량은 반대의 순서를 보였다. 이는 대안 B에서는 비감소수확과 재적생산량 조건의 강도를 높인 반면 벌채면적 제한은 낮추어 가용벌채량을 극대화하였기 때문이며, 대안 D에서는 탄소저장량 조건을 강하게 설정하여 탄소저장에 우선순위를 두었으므로 가용벌채량이 축소되었기 때문이다.

Fig. 2와 Fig. 3은 각 대안의 분기별 재적생산량과 탄소저장량을 비교한 그래프이다. 분기별 재적생산량은 모든 대안에서 5분기까지 증가하다가 그 이후부터는 일정한 수준을 유지하는 것으로 나타났다. 구체적으로는 허용감소율을 10%로

설정된 대안 D에서만 약간의 변동이 있었으며, 나머지 대안에서는 비감소수확 조건으로 인해 일정한 생산량을 유지하였다. 초기의 재적생산량이 낮은 것은 현존 임분의 대부분이 II - IV영급에 해당하는 반면 최저 벌기령을 60 - 70년으로 설정하였기 때문에 현존 임분이 벌기령에 도달하는 기간동안은 제한된 일부 지역에서만 재적생산이 가능하기 때문이다.

분기별 탄소저장량 역시 대체로 유사한 경향을 보였으며, 특히 계획기간 초기에는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 그러나 재적생산량과는 달리 대안 D가 모든 분기에서 가장 높은 값을 보였으며, 다음으로 대안 A, C, B의 순서로 나타났

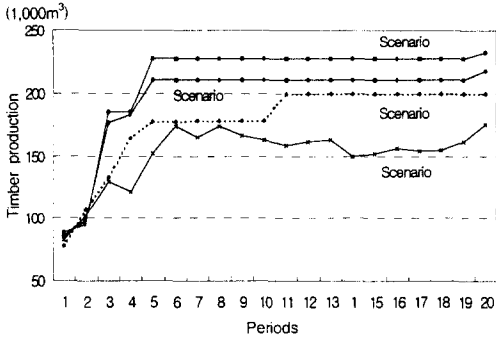


Fig. 2. The optimal flow of timber production

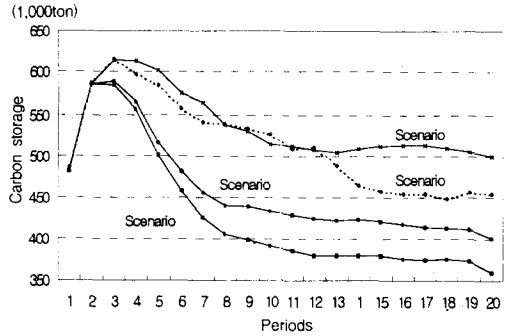


Fig. 3. The optimal flow of carbon storage

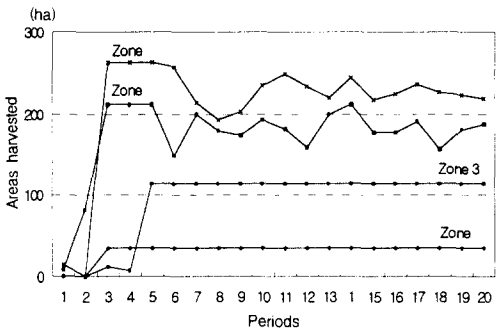


Fig. 4. The optimal cut areas by period for scenario C

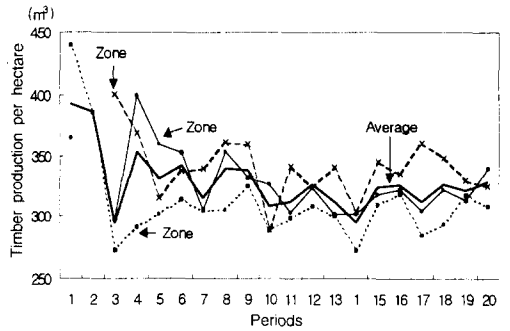


Fig. 5. The optimal timber productions per hectare by period for scenario C

다. 각 대안간의 차이는 앞서 언급한 바와 같이 벌채가능 지역의 축소로 인해 잔존 임분이 증가하고, 그에 따른 축적의 증가가 탄소저장량의 증가로 연결되었기 때문이다.

한편 탄소저장량이 초기에 증가하는 것은 현존 임분의 성장과 관계가 있다. 즉, 현존 임분은 활엽수(상수리나무)와 신갈나무가 면적과 축적의 50% 이상을 차지하고 있으며, 이들 수종은 다른 수종에 비해 상대적으로 우수한 탄소저장기능을 갖는다. 따라서 수식모형에서 재적극대화를 목적함수로 선택하였으므로 II - IV영급으로 구성된 현존 임분이 벌기령에 도달하는 3분기 이후에는 현존 임분을 재적생산에 유리한 수종으로 갱신하게 되며, 그 결과 탄소저장량은 점차 감소하게 된다. 그리고 수종갱신에 따라 미래 임분이 보속림 구조를 형성하게 되는 10분기 이후부터 탄소저장량은 다시 일정한 수준을 유지하였다.

## 2. 임상 변화 분석

최적경영안에 따른 임상변화를 분석하기 위해 대안 C를 선정하였으며, Fig. 4와 Fig. 5는 대

안 C의 벌채면적과 ha당 재적생산량을 구역별로 나타낸 그래프이다.

벌채면적은 재적생산량과 밀접한 관계가 있으므로 전체적인 추이는 재적생산량과 유사한 형태를 보였으며, 3분기 이후부터는 벌채면적조절 조건의 영향으로 일정한 수준을 유지하였다. 구역별로는 벌채면적 제한을 완화한 1, 2구역의 벌채면적이 많았으며, 3, 4구역은 현존 임분의 갱신조건을 제약조건에서 제외하고, 벌채허용 비율도 구역면적의 12%와 3% 이내로 제한하였기 때문에 벌채면적이 상대적으로 적었다. 특히 3구역의 경우 벌기령을 다른 구역보다 20년 연장하여 적용하였기 때문에 현존 임분이 벌기령에 도달하는 4분기까지는 벌채면적이 극히 적은 것으로 나타났다.

ha당 재적생산량의 경우는 구역별로 다소 차이는 있으나 평균적으로 약 330m<sup>3</sup>/ha 내외의 재적생산이 가능한 것으로 나타났다. 그리고 모든 구역에서 초기의 ha당 재적생산량이 높은 값을 보이고 있는데 이는 초기 벌채의 경우 벌채면적이 작고, 현존 임분 중에서 임령이 많은 일부 지역

에서만 벌채가 이루어지기 때문이다

Fig. 6은 분기별로 각 구역의 축적 변화를 나타낸 그래프이다. 1, 2구역은 보속림의 유도를 위해 현존 임분이 10분기 이내에 갱신되도록 하였고, 계획기간말의 영급 구조도 I~VI영급의 면적이 각각 100ha 이상이 되도록 하였다. 따라서 현존 임분이 벌기령에 도달하는 3분기까지는 축적이 증가하다가 4분기부터는 재적생산량의 증가에 따라 잔존 축적이 급격히 감소하여 6분기 이후부터는 일정한 수준을 유지하는 것으로 나타났다.

한편 3구역은 현존 임분의 갱신기간을 제한하지 않은 반면 1, 2구역과 동일하게 계획기간말의 영급구조를 제한하였으므로 잔존 축적은 1, 2구역에 비해 상대적으로 많았으나 축적의 변화 경향은 유사한 형태를 보였다. 또한 현존 임분의 갱신조건과 계획기간말의 영급구조 조건을 모두 제외한 4구역의 경우 현존 임분의 축적 증가에 따라 잔존 축적이 지속적으로 증가하는 경향을 보였다.

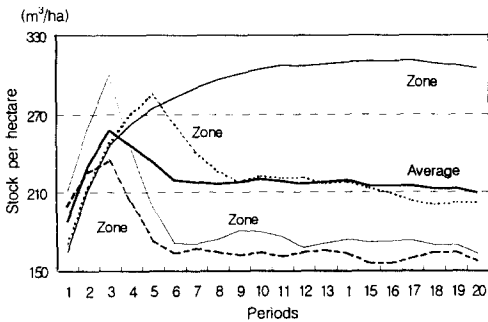


Fig. 6. The changes of growing stock by period for scenario C

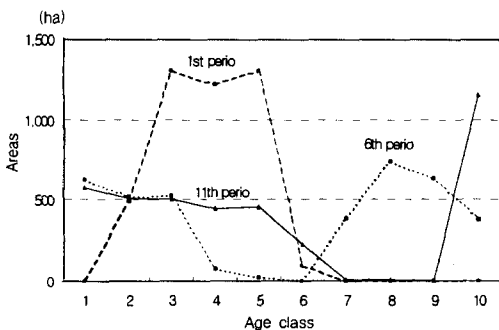


Fig. 7. The changes of ending inventory for scenario C

Fig. 7은 1, 6 및 11분기말의 전체 임분의 영급 구조를 나타낸 그래프이다. 1분기에는 III~V영급이 대부분을 차지하였으나 6분기에는 5분기까지의 갱신 결과와 현존 임분의 임령증가로 I~III영급과 VII~X영급으로 양분되는 구조를 보였다. 그리고 1, 2구역은 10분기이내에 현존 임분이 모두 갱신되도록 제한하였으므로 11분기에는 I~VI영급이 비교적 고른 분포를 보였다. 특히 11분기 이후에는 임분 구조와 갱신시기에 관한 제약조건을 완화한 3, 4구역의 임분이 성장함에 따라 X영급 이상의 임분이 증가하는 것으로 나타났다.

### 결론

이 연구에서는 산림경영계획의 수립을 위해 선형계획 수식모형을 제시하고, 사례분석을 통해 경영대안과 대안별 최적 경영안을 수립, 분석하였다. 수식모형의 목적함수로는 재적생산량을 선정하였으며, 제약조건으로는 비감소수확, 재적생산량조절, 벌채면적조절, 토사유출량조절, 갱신수종의 다양성 확보, 탄소저장량조절, 계획기간말의 영급구조조절 등을 채택하였다.

춘천국유림 관리소의 가리산 지역을 대상으로 사례분석을 실시한 결과 재적생산량이 높은 대안에서는 탄소저장량이 낮게 나타났으며, 반대로 탄소저장량을 증가하도록 하였을 경우에는 재적생산량이 감소하는 것으로 분석되었다. 그리고 현존 임분의 갱신 시기와 갱신 수종에 따라 재적생산량이나 탄소저장량이 결정되는 것으로 나타났다. 따라서 제약조건 강도 조절을 통해 경영자가 의도하는 재적생산과 탄소저장 수준을 산림경영계획에 반영할 수 있을 것으로 기대된다.

한편 산림경영에 영향을 주는 다양한 요인들을 선형계획 수식모형에 반영하기 위해서는 이들 인자들을 정량화하여 함수 형태로 표현할 수 있어야 한다. 아울러 계획 수립의 효율성을 높이기 위해 다목적계획 분야와 환경·생태적 산림관리 방안에 대한 보다 구체적인 연구가 뒷받침되어야 할 것이다.

### 인용문헌

1. 박은식. 1998. 다목적 산림경영을 위한 산림정보시스템의 개발과 적용. 서울대학교 박사



- 학위논문. 131pp.
2. 박재현. 1995. 백운산 성숙활엽수림 개별수  
확지에서 벌출직후의 환경변화와 운재로 침  
식에 관한 연구. 서울대학교 박사학위논문.  
137pp.
  3. 산림청. 1995. 영림계획운영요강. 산림청 훈  
령집. 1455-1479.
  4. 우종춘. 1991. Linear Programming에 의한  
삼림경영계획 - 잣나무 임분의 삼림수확계획  
을 중심으로 -. 한국임학회지 80 : 427-435.
  5. 임업연구원. 1994a. 공무해의출장 귀국보고서  
(온실가스 저감방안 및 평가. 미국). 139pp.
  6. 임업연구원. 1994b. 한국산 주요 목재의 성  
질과 용도. 119-265pp.
  7. 임업연구원. 1996. 임업연구원 연구보고서 4  
-IV 330pp.
  8. 정주상·박은식. 1993. 대단지 산림의 목재  
생산계획 분석을 위한 선형계획 실험전산모  
델에 관한 연구. 한국임학회지 82(3) : 292-  
304.
  9. Johnson, K.N. and H.L. Scheurman. 1977.  
Techniques for Prescribing Optimal Timber  
Harvest and Investment under Different  
Objectives-Discussion and Synthesis. Forest  
Science Monograph 18.
  10. Johnson, K.N., T.W. Stuart and S.A.  
Crim. 1986. FORPLAN Version 2 : An  
Overview. USDA Forest Service.