

大團地 山林의 木材生産計劃 分析을 위한 線型計劃 실험전산모델에 관한 研究¹

鄭主相² · 朴恩植²

A Study on Developing An Experimental Model to Solve for Optimal Forest-Level Timber Harvesting Schedules Using Linear Programming¹

Joo Sang Chung² and Eun Sik Park²

要 約

이 연구에서는 대단지 산림자원의 收穫伐採計劃 수립을 위한 선형계획 전산모델의 기초체계를 제시하였다. 모델에서 사용한 선형계획수식화모형은 非減少收穫에 허용증감율을 적용하여 목표립의 유도, 최소 목재공급의 한계 및 최대 벌채면적의 한계와 같은 산림생산 제약조건들을 포함하고 있다. 이 모델에서는 Model I 및 Model II 기법에 의한 선형계획 수식화가 가능하고, Matrix 출력은 MPS 양식에 의한다. 전산모델 개발에 있어서 선형계획기법에 의한 산림자원 經營分析方法論의 妥當性은 문헌고찰에 의해 이미 국내에 소개된 바 있는 減反率法 및 二分檢索法의 解法特性과의 比較考察을 통해 검토하였다. 또한 제시된 모델체계의 적용성은 대규모 산림자원 경영계획을 수립하기 위한 사례분석을 통해 검토하였다. 사례분석을 위한 연구대상지로 서울대학교 남부연습림 백운산지역(약 11,000ha)을 선택하여 위에서 제시된 山林生産 制約因子들을 동시에 만족시킬 수 있는 最適伐採計劃을 수립하고, 목재생산 제약인자들의 강도에 대한 영향력을 분석하였다.

ABSTRACT

This research developed a forest-level harvest scheduling model using linear programming (LP). The formulations of the LP model include timber production schemes with constraints of nondeclining yield forest conversion strategies, the minimum timber supply levels and the maximum cut acrages. The model is able to generate both Model I and Model II types of input matrix in MPS format. In this paper, use of LP in building the framework of the strategic forest planning model was justified by comparing the algorithmic characteristics of LP with those of Gentan probability and binary search approaches through literature reviews. In order to demonstrate the field applicability of the model proposed, (1) the harvest scheduling problem for about 11,000-hectare case study area Mt. Baekun area in Southern Experimental Forest of Seoul National University) was formulated and solved and (2) the effects of the change in basic regulatory timber production constraints on optimal harvesting schedules were investigated.

Key words : Optimal forest-level harvest schedule, Linear programmig, Gentan probability, Binary search, Model I, Model II, Regulatory timber production constraints

¹ 接受 1993年 6月 18日 Received on June 18, 1993.

² 서울대학교 山林資源學科 Department of Forest Resources, Seoul National University Suwon, Korea.

I. 緒 論

최근 우리나라 산림자원의 활용방향은 목재생산이라는 經濟的 側面과 함께 국토보전, 수원함양, 환경정화 등과 같은 公益的 側面에서의 이용이 강조되는 추세이다. 따라서 국, 공유림을 위시한 모든 산림자원을 합리적으로 이용하고 다각적인 경영목표를 동시에 만족시키기 위해서는 한정된 자원의 효율적인 이용이 요구된다. 그러나 현실적으로 산림자원의 경영문제는 장기간의 성장기간을 요구하는 임목의 특성과 극도로 복잡한 양상을 보이는 林地 特性 및 自然生態의 變化 등으로 인해 종래의 방법으로는 다변적인 경영문제의 본질을 파악하기 어려움은 물론 구체적이고 종합적인 경영계획안을 제시하기는 더욱 어렵다. 面積法, 材積法 등과 같은 기존의 경영계획기법들은 현존 임상의 개황과 토지비옥도, 임도 및 지형적 특성 등에 의한 구분을 충분히 고려할 수 없고 다만 劃一的이고 단순한 경영계획안만을 제시할 수 있었다. 따라서 수치해석에 의한 평가분석을 기대하기 어려울 뿐만 아니라 목재생산외의 산지이용 및 보전을 위한 경영목표들은 전혀 고려할 수 없었다.

합리적인 경영계획을 수립하기 위해서는 먼저 경영목적, 경영환경, 경영방침 및 임분의 지리적, 생태적 특성에 따른 임목의 성장환경 등과 같은 諸般 經營要件들에 대하여 정확히 인식하고, 주어진 문제를 定量的으로 分析할 수 있는 토대를 마련하여야 한다. 이를 위해 歐美에서는 현대적인 경영계획기법으로서 컴퓨터를 이용하는 數學的 原理를 도입하고 있으며 그 결과 기존의 가정들을 현실화함과 동시에 임업생산체계 및 경영활동을 보다 논리적으로 해석하므로써 명확한 경영분석이 가능하게 되었다.

이러한 노력의 일환으로 주리원(1984)은 임업 경영계획 수립에 선형계획기법을 적용 하였으며, 권오복과 장철수(1988)는 선형계획 수식화기법에 대하여 고찰하였고, 권오복 등(1989)은 미국에서 이미 실용화되어 폭넓게 이용되고 있는 FORPLAN 모델의 구조 체계에 대하여 연구하였다. 우중춘(1991), 이광원 등(1991)은 각각 목재생산 계획 및 산림부산물 생산계획 수립에 대하여 선형계획기법을 적용한 바 있으며, 그 외에 최종찬 등(1987)과 이광원 등(1991)에 의해 일본의 스즈

키(鈴木太七)가 개발한 減反率法의 理論的 體系가 국내에 소개된 바 있다.

이 연구는 여러가지 수학적 원리를 이용한 현대적 의미의 산림자원 경영계획기법중 선형계획법을 적용한 실험전산모델을 개발하는데 그 목적이 있다. 따라서 이 논문에서는 (1) 文獻考察을 통해 기존의 전통적인 simulation 기법인 二分檢索法과 최근 국내에 소개된 바 있는 減反率法을 線型計劃技法과 비교고찰함으로써 계획기법상의 타당성을 검토하고, (2) 실험전산모델의 체계를 제시하며, (3) 산림자원 경영계획 수립을 위한 事例分析 過程을 통해 제시된 모델에 적용된 목재생산 제약인자들의 변화가 최적 경영계획 수립에 주는 영향을 분석하였다.

II. 經營計劃技法의 檢討

二分檢索法(binary search)은 임분생장에측모델과 산림축적자료를 이용하여 한정된 계획기간 동안 분기별로 일정하게 생산할 수 있는 재적을 결정하므로써 가치의 最大值를 찾는 시뮬레이션 기법이다. 즉, i 번째 분기에 생산되는 재적의 총량 또는 가치를 $i+1$ 번째 분기에도 동일하게 생산할 수 있는 값들 중에서 가장 적합한 伐採施業案을 반복계산을 통해 찾아내는 방법이다. 이 방법을 이용한 모델들은 미국에서 1960-70년대에 걸쳐 많이 개발되었으며 그 대표적인 모델로는 SORAC(Chappelle, 1966), SIMAC(Sassaman et al., 1972), TREES(Tedder et al., 1980), ECHO(Walker, 1976) 등이 있다.

그러나 이분검색법의 적용에서는 변수가 伐採水準 한가지 뿐이므로 모델내에서는 단순히 伐採量만을 결정하게 되고, 土地分配나 施業選擇, 林分選擇의 優先順位 등과 같은 중요한 결정은 외부에서 주어져야 한다는 단점이 있다. 따라서 외부 결정사항이 최적이지 아니라면 이 기법에 의해 계산된 벌채계획안 역시 최적이라 할 수 없을 것이다. 意思決定論(decision-making science)에서는 이와 같이 개략적인 방법으로 결정되는 최적해를 발견적 해(heuristic solution)라고 하여 선형계획법에서의 最適解(optimal solution)와 구별하고 있다.

減反率法은 1963년 일본의 스즈키에 의해 개발된 목재생산 예측모델이고, 여기서 감반율이란

Table 1. Comparisons of the algorithmic characteristics of three forest-planning approaches : Gentan probability, binary search and linear programming.

	Gentan Probability	Binary Search	Linear Programming
Model types	stochastic simulation	deterministic simulation	deterministic operation reserch
Number of constraints	•	1	≥ 1
Mathematical algorithms	probability function	binary search	simplex algorithm
Computational burden	relatively simple	relatively simple	complex
Types of solution set	probabilistic	heuristic	optimal

面積減少率을 의미한다(鈴木太七, 1963). 예컨대, 어떤 특정지역의 산림을 대상으로 과거의 경험으로부터 앞으로 일정기간 후의 임분구조를 예측하므로써 주어진 기간동안 생산될 수 있는 목재생산을 예측하게 된다. 이러한 일련의 목재생산계획은 감반율이라는 確率 혹은 면적감소율을 결정함으로써 가능해진다.

鈴木太七에 의하면 감반율이론은 산림의 齡級推移에 대하여 마르코프-체인이론을 적용하여 개발한 것으로 감반율의 의미는 不特定多數의 산림소유자의 통합된 意思를 나타내는 확률이라고 볼 수 있다. 즉, 영급의 추이를 나타내는 齡級推移確率을 확정하고 그러한 行列의 安定性이 유지된다고 가정할 때 미래의 임분추이를 예측할 수 있다는 것이다. 이러한 가정에 기초한 목재생산의 예측은 감반율을 결정하므로써 경영분석을 쉽게 할 수 있다는 장점이 있으나 결국 과거의 추세가 미래에도 지속될 것이라는 가정에 입각하고 있다는 문제점을 안고 있다.

한편 산림의 다목적 경영이 강조되면서 선형계획기법의 적용이 더욱 중요해지고 있다. 여러가지 數理計劃法중 선형계획법은 그 구조가 비교적 단순하며, 산림자원경영과 관련된 여러가지 제약조건들 및 의사결정변수들을 동시에 처리하는 계산능력이 뛰어나므로 歐美에서는 산림자원의 다목적경영을 위한 필수적인 분석도구로서 이미 실용화되어 사용되고 있다.

선형계획법에서 사용하는 團體法(simplex method)은 이분검색법과는 달리 최적해를 찾기 위해 가능해를 모두 조사할 필요가 없기 때문에 최적해를 구하는데 매우 효율적이며 감응도 분석을 쉽게 할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 선형

계획법은 모든 관계를 선형으로 가정하기 때문에 非線型問題의 處理에 제한이 있으며, 그 성격상 可分性으로 인한 제약이 없지 않다.

Table 1은 이상의 3가지 기법의 특성을 비교 요약한 것이다. 표에서 보는 바와 같이 선형계획법은 다른 두가지 방법에 비해 현재의 경영여건 및 경영목적들을 보다 폭넓게 수용할 수 있으며 미래의 不確實性에 대한 感應度 分析이 용이하다. 단지 함수모형에 관계되는 인자들이 많아지므로 문제가 커지고, 함수모형을 풀기 위한 계산이 상대적으로 복잡하다 할 수 있다. 그러나 전산기술의 발전과 더불어 계산상의 문제는 이미 해결되고 있을 뿐만 아니라 다른 두 기법에서 제시할 수 없는 최적해를 구할 수 있다는 장점이 있으므로 대규모 산림의 다목적 경영분석에 적합하다고 할 수 있다.

III. 線型計劃 實驗電算모델의 開發

1. 電算모델 體系

대규모 산림자원의 경영계획을 수립하기 위해서는 대상이 되는 산림의 임상구조, 생태적, 지형적 특성과 같은 생산환경은 물론 생산성, 시장성 및 정책과 같은 산림생산 외적 정보까지도 충분히 검토되어야 한다. 이러한 인자들중 제반 생산환경, 생산성 및 시장조건은 임업생산시스템 분석자료로서 미래의 경영활동을 예측하고 분석하기 위한 기초정보를 제시하게 된다. 정책적 목표 및 방향은 기초정보 토대위에서 현존 山林資源의 經營方向을 설정하는 것으로 현실적인 경영목적 및 경영상의 기본제약을 의미한다. 따라서 이 연구에서 제시하고자 하는 선형계획기법을 적

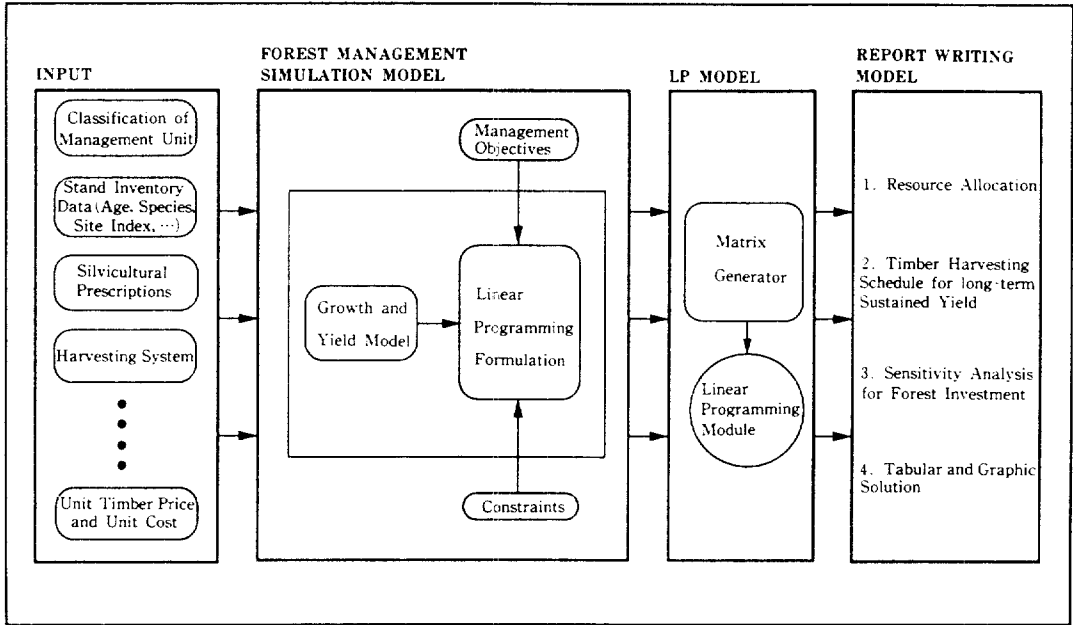


Fig. 1. Structure of the forest-level management planning model.

용한 전산모델은 산림정책적 고려에 따른 경영상의 기본제약들을 동시에 만족시키면서 장, 단기 수익 혹은 목재 공급을 극대화할 수 있는 전산체계가 된다.

Fig. 1은 본 연구에서 이용한 모델의 전체적인 체계를 나타낸다. Fig. 1에서 보듯이 경영계획모델은 대상산림에 대한 수종, 임령, 지형특성 등과 같은 자료를 입력받아 최종적으로 산림생산오소의 적정분배, 보속림 유도를 위한 적정 수확계획, 경영인자에 대한 감응도 분석 등을 제시하게 되며 그 체계는 임분생장예측모듈, 선형계획수식화 모듈, 최적해 해석모듈 등으로 구성되어 있다. 연구목적상 전산모델은 퍼스컴과 IBM 3090 대형컴퓨터를 이용하여 개발하였고, 선형계획모형의 최적해 계산은 MPSX 370을 이용하였다.

2. 모델의 構成要素

임분생장 예측 모듈

임업경영분석에서 가장 중요한 요소는 대상지역의 임분생장을 예측하는 일이다. 얼마나 정확하게 임분생장을 예측할 수 있는가에 따라 얻어진 경영계획안의 현실성이 결정되기 때문에 시간에 따른 임분의 질적, 양적 변화를 올바르게 파악할 때 합리적인 경영계획을 수립할 수 있으므로

반드시 미래임분에 대한 정확한 예측이 이루어져야 한다. 그러나 임분의 발달은 그 지역의 수종, 임지비옥도, 임령, 식재밀도 등 여러가지 인자들에 의해 복합적인 영향을 받게되므로 생장예측이 쉽지 않다. 특히 시간 혹은 임분생장에 따라 動的인 生態變化를 거치게 되므로 임분의 생장예측은 더욱 어려운 문제가 된다. 따라서 임분의 생장예측은 비교적 쉽게 고려할 수 있는 대표적인 生長因子들의 函數關係를 統計的 方法으로 推定함으로써 단순화된 回歸函數式 또는 材積表를 만들어 사용할 수 있다.

Davis와 Johnson(1986)에 의하면 이러한 예측함수들은 Table 2에 나타나는 바와 같이 林分密度 獨立的 函數模型과 林分密度 依存的 函數模型으로 구분할 수 있다. 임분밀도 의존적인 방법은 임분생장을 임분밀도와 연관하여 예측하는 것이고 임분밀도 독립적인 방법은 임분이 자연상태의 평균밀도를 갖는다고 가정하고 임분생장을 예측하는 방법이다. 일반적으로 密度因子가 고려됨으로서 보다 정밀한 생장예측은 물론 간벌 등과 같은 임분밀도 조절시업의 영향을 충분히 고려할 수 있다는 장점이 있으나 자료수집에 요구되는 시간 및 비용의 문제로 인해 흔히 임분생장을 林齡과 林地肥沃度의 函數로 나타내는 밀도독립적

Table 2. A classification of growth and yield models (after Davis and Johnson, 1986).

Density-free models		$V_A = f(A, S)$	
Variable-density models			
		Current volumes (V_1)	Future volumes (V_2)
1 Explicit models	$V_1 = f(A, S, D)$	Direct growth prediction	Stand density prediction
		$g_{12} = f(S, A, D_1)$ $V_2 = V_1 + g_{12}$	$D_2 = f(S, A_1, A_2, D_1)$ $V_2 = f(S, A_2, D_2)$
2 Implicit models	$f(d_i) = f(A, S, D)$	$D_2 = f(S, A_1, A_2, D_1)$	
	$V_1 = f(d_i)$	$f(d_i)_2 = f(S, A_2, D_2)$	
	$V_1 = \sum_i v_i (nd_i)_1$	$V_2 = \sum_i v_i (nd_i)_2$	

Definitions :

- S = site index
- D = stand density
- P_{12} = length of growth period
- v_i = average volume per tree in diameter class i
- V_1 = current stand volume
- g_{12} = stand growth over one growth period
- nd = number of trees in diameter class i
- nd_{1i} = number of trees in diameter class i at start of a growth period
- nd_{2i} = number of trees in diameter class i at end of a growth period
- A = stand age
- i = diameter class
- d_i = size of diameter class i
- V_A = stand volume at age A
- V_2 = stand volume at end of growth period
- $f(d_i)$ = diameter distribution function

방법을 많이 사용하고 있다.

한편 지금까지 국내에서 사용된 많은 임분생장 예측함수들은 다음의 식(金東春, 1967; 金東春과 李興均, 1966; 俞鎮禹 等, 1986; 俞鎮禹와 盧奎亨, 1987) 과 같이 임분재적을 단순히 임령의 함수로 표시하였다. 또한 지역적 임분특성을 고려한 생장함수보다는 전국적인 임상자료에 의거하여 수종별 임분생장에측을 위한 함수모형의 개발에 치중하여 왔다.

$$\log V = a + b \log T + c \cdot T$$

V : 임분재적, T : 임령, a, b, c : 회귀계수

하지만 이러한 생장에측함수모형들은 재적의 변화에 직접적인 영향을 주는 인자를 임령단으로 국한시키므로써 임지비옥도나 임분밀도에 의한 생산성을 고려할 수 없다는 단점을 지니고 있다.

본 연구에서 제시된 생장에측함수 추정을 위한 전산모델은 밀도독립적 모형들을 非線型數值變換 및 多重回歸分析法에 의해 추정하도록 되어 있다. 그 외에 모델 이용자가 이미 알고 있는 생장함수를 직접 입력하는 방법도 가능하게 만들어 회귀함수의 모형선택을 자유롭게 하였다. 따라서 이 모델을 이용하여 생장함수를 추정할 경우에는

산림조사부와 같은 경영분석 대상지의 小班資料를 직접 입력할 수 있고 또한 매목조사 등에 의한 입목자료들을 이용할 수도 있다.

선형계획 수식화 모듈

일반적으로 대규모 산림의 경영에서는 목재생산계획을 중심으로 다목적경영을 계획하게 된다. 따라서 목재생산과 관련된 제반 제약조건들을 만족시켜야 함은 물론 그외의 정책적 목표를 동시에 충족시킬 수 있는 계획이 수립되어야 한다. 이러한 문제를 풀기 위해 선형계획기법에서는 목적함수 및 제약조건함수들을 필요로 한다.

수확벌채 계획과 관련하여 많이 이용되는 목적함수는 純收益의 極大化 혹은 목재생산량의 극대화 같은 형태가 된다. 이러한 형태의 경영목적들은 순수익 및 생산량과 같은 수치에 의해 비교분석이 가능하므로 최적경영시안을 결정하기 위한 객관적인 판단 척도로 이용될 수 있기 때문이다. 이 연구에서 개발된 모델에서는 경영목적의 성취에 대한 판단척도에 따라 전체 경영계획 기간중 혹은 제 1분기만의 순현재가 혹은 목재생산량을 극대화할 수 있도록 하였다. 목적계수는 임분생장에측함수에 의한 분석과정을 거쳐서 단위면적

당 생산성 혹은 순수익으로 산출될 수 있다.

본 전산모델에서 고려된 산림경영을 위한 基本制約條件들은 다음과 같이 크게 세가지로 집약될 수 있다.

a. 現存山林의 保續林 體系 誘導: 경영자의 입장에서 보면 산림에서의 수확이 매년 균등하게 또 영구히 존속할 수 있도록 하는 것이 필요하며 이는 보속림 유도에 소요되는 기간과 분기별 수확량을 결정하므로써 가능하다. 그러나 완전한 의미의 보속생산을 이루는 것은 임분구조의 불균등한 분포와 시간에 따른 임분생장의 可變性 때문에 현실적으로 불가능하다. 따라서 보속림 유도를 위한 제약조건을 다음 식과 같이 緩和하여 적용함으로써 모델 스스로 목적함수를 극대화하는 방향에서 최적의 보속체계 유도 방안을 결정할 수 있도록 하였다.

$$H_i \leq H_{i+1}$$

(H_i : i분기의 생산재적: $i=1, 2, \dots, n$)

이 식에 의하면 생산되는 재적은 시간의 흐름에 따라 줄어들 수는 없게 되므로 지속적인 생산체계를 지닌 보속림에 도달하게 된다. 하지만 현실적으로 非減少收穫을 엄격하게 적용할 수 없는 경우가 많아 선형계획법에 그대로 적용할 경우 수학적으로 최적해가 포함되는 가능해지역이 존재하지 않을 수 있으므로 본 모델에서는 增減變動率을 허용하였으며 그 비율은 모델의 이용자가 결정하게 된다.

b. 伐採面積의 制限: 목재를 생산하기 위한 경영활동은 많은 경우에 있어서 여러가지 환경문제를 일으키게 되며 특히 대면적 개벌의 경우 생산성 측면의 이점이 있는 반면 환경, 생태적 부작용이 심각한 것으로 알려져 있다. 따라서 산림의 벌채면적을 제약하는 것은 木材生産과 環境生態의 毀損 防止라는 상충되는 두가지 목적을 동시에 만족시키는 하나의 방안이 될 수 있을 것이다. 본 모델에서는 각 분기별 벌채면적을 경영구역면적의 一定比率以下로 제한하는 방법을 사용하였다.

c. 最低 伐採材積의 制限: 이 제약조건은 생산되는 재적의 양을 조절한다는 점에서 보면 비감소수확 제약조건과 유사한 면이 있으나 비감소수확 제약조건은 분기별 재적 생산량을 조절함으로써 전술한 目標林 즉 보속수확 체계를 갖춘 산림으로의 유도가 그 목적인 반면 최저재적생산 재

약조건은 생산되는 재적의 하한선을 설정하여 목재공급조절을 위한 방안이 될 수 있다. 또한 특정 시기 이후의 목재공급량의 하한선을 설정함으로써 비감소제약조건외의 허용감소율에 의한 증감폭을 감소시켜 안정된 목재공급계획을 수립할 수 있게 된다. 그러나 목재자원은 一回의 생산을 위해 장시간을 필요로 하기 때문에 단시일 내에 높은 재적을 생산한다는 것은 불가능한 일이므로 최저벌채재적을 설정할 때에는 적용시기와 산림의 現實蓄積에 대한 고려가 필수적이다.

이상의 수식모형은 이용자의 선택에 의해 포함되거나 제외될 수 있고, 또한 Model I 혹은 Model II 수식화기법에 의해 완성되어 최종출력은 MPS(Mathematical Programming System)양식으로 출력된다. Model I 혹은 Model II 수식화기법에 대해서는 이미 권오복과 장철수(1988)가 국내에 소개한 바 있다.

최적해 해석 모델

선형계획수식화모델과 임분생장에측모델이 관계인자들간의 함수관계를 이용하여 선형계획 수식모형을 만드는 것과는 달리 최적해 해석모델은 선형계획 프로그램의 실행 결과로 얻어진 출력자료를 보다 알기 쉽고 요약된 형태로 변환시켜 정리하는 역할을 하게 된다.

IV. 事例分析에 의한 전산모델의 適用

研究對象地

이 연구는 서울대학교 남부연습림중에서 지리산 국립공원 지역을 제외한 전남 광양군 백운산 일대의 10,891ha를 대상으로 하였다. 이 지역은 지리적으로 溫帶南部地域에 위치하고 있으며 표고는 약 80m에서 1,200m로서 산림대의 수직분포가 뚜렷하고 식생구조도 비교적 다양한 편이다. 지형조건은 대체로 험준한 산악지형을 보이며 전체산림은 32개의 林班으로 이루어져 있다.

Table 3과 4에서는 연구대상지의 수종, 지위 및 영급분포를 보여주고 있다. 이 지역은 참나무류 등의 낙엽활엽수가 전체면적의 85%(9,252ha)로 대다수를 차지하고 있으며 나머지는 소나무, 잣나무, 리기다 소나무 등의 침엽수 人工造林地로 구성되어 있다. 임지비옥도는 中級地에 속하는 지역이 전체지역의 81%로 대다수를 차지하고

Table 3. Aggregated site classifications by species and site qualities of the study area. (hectares)

Species	Site Quality			Total
	Low	Medium	High	
Broad-leaved spp.	1,121	7,580	551	9,252
<i>Pinus koraiensis</i>	59	56	-	115
<i>Pinus rigida</i>	121	412	9	542
<i>Larix leptolepis</i>	28	40	29	97
Other pine spp.	82	769	34	885
Total	1,411	8,857	623	10,891

Table 4. Aggregated site classifications by species and age classes of the study area. (hectares)

Species	Age Classes					Total
	0-10	11-20	21-30	31-40	41-50	
Broad-leaved spp.	63	1,168	4,911	3,105	5	9,252
<i>Pinus koraiensis</i>	45	38	2	3	27	115
<i>Pinus rigida</i>	7	114	398	16	7	542
<i>Larix leptolepis</i>	12	61	3	2	19	97
Other Pine spp.	27	450	376	28	4	885
Total	154	1,831	5,690	3,154	62	10,891

있고, 영급분포는 3영급(52%)과 4영급(29%)이 대다수를 차지하고 있는 반면 5영급 이상의 임분은 0.6%로 적은 면적을 차지하여 비교적 偏重된 齡級分布를 보이고 있다.

林分生長 豫測 函數의 推定

임분성장함수는 산림자원조사부 자료중에서 임령 및 지위에 반해 임목축적이 비정상적으로 과도하거나 과소한 자료를 제외한 나머지 자료들을 기초로 추정하였다. Table 5는 대상지역의 수종별 임분성장함수와 그 함수의 결정계수 및 해당 수종에 대한 소반의 수를 요약한 것이다. 표에서 제시된 임분성장함수중에서 활엽수 및 기타 침엽수림의 결정계수가 다른 수종에 비해 낮게 나타났는데 이는 혼효림의 임상구조가 단순침엽수림에 비해 그 변이가 크기 때문인 것으로 판단된

다.

經營分析 問題의 數式化

연구목적상 전체 지역을 水系에 의해 두개의 경영구역으로 구분하였다. 각 구역은 Table 3과 4에서 제시된 바와 같이 5개의 수종, 上, 中, 下에 의한 林地生産力 및 10년 단위의 영급분포에 따라 구분하므로써 전체 지역은 총 300개의 경영 분석 단위로 세분되었다. 한편 경영계획기간은 10년 단위의 20분기 즉 200년으로 설정하였다. 이와같은 장기간에 걸친 분석은 현존 산림의 전체구조가 보속림 체계로 유도되는 과정을 검토하고, 분기별 사업계획을 장기적인 안목에서 제시하기 위한 것이다. 그 외에 전체 계획기간 20분기 중 前半 10分期 以內에 전지역을 최소한 한번 이상 벌채하며, 현재의 임분이 벌채된 후 更新되

Table 5. Timber growth functions by species.

Species	Observ.	Growth functions	R ²
Broad-leaved spp.	281	$\ln(V) = 5.8261 - 0.0571 \text{ SI} - 52.8957 / \text{Age}$	0.87
<i>Pinus koraiensis</i>	16	$\ln(V) = 6.2129 - 0.2516 \text{ SI} - 49.1849 / \text{Age}$	0.93
<i>Pinus rigida</i>	29	$\ln(V) = 5.5967 - 0.0239 \text{ SI} - 32.5532 / \text{Age}$	0.92
<i>Larix leptolepis</i>	15	$\ln(V) = 6.3193 - 0.3093 \text{ SI} - 51.7034 / \text{Age}$	0.91
Other pine spp.	37	$\ln(V) = 6.2575 - 0.2370 \text{ SI} - 46.9897 / \text{Age}$	0.76

*V: Stand volume in m³ per ha, SI: site quality index, Age: stand age.

In determining the regression equations, the ordinal site quality indices were represented by 1 for low, 2 for medium and 3 for high.

Table 6. Model I problem formulation

$$\begin{aligned}
 \text{Max. } z &= \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^5 \sum_{l=1}^{10} \sum_{m=1}^M c_{ijklm} \cdot X_{ijklm} \\
 \text{subject to} & \sum_{m=1}^M X_{ijklm} = A_{ijkl} \quad \text{for all } i, j, k, l. \\
 & \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^5 \sum_{l=1}^{10} \sum_{m=1}^M v_{ijklmp} \cdot X_{ijklm} - H_p = 0 \quad \text{for all } p. \\
 & \sum_{k=1}^5 \sum_{l=1}^{10} \sum_{m=1}^M \gamma_{ijklmp} \cdot X_{ijklm} - TCA_{ijp} = 0 \quad \text{for all } i, j, p. \\
 & \sum_{j=1}^3 TCA_{ijp} \leq \beta \cdot ZA_i \quad \text{for all } i, p. \\
 & H_p \geq BV_p \quad \text{for all } p. \\
 & H_p - \alpha \cdot H_{p-1} \geq 0 \quad (p = 2, 3, \dots, 20)
 \end{aligned}$$

z : objective value (total harvest volume for the planning horizon in cubic meters).
H_p : total harvest volume in period p.
BV_p : lower bound constant for the minimum harvest volume in period p.
v_{ijklmp} : per hectare harvest volume in cubic meters for management zone i, site quality index j, species k, age class l, management regime m and period p.
c_{ijklm} : objective function coefficients for the corresponding subscripts.
X_{ijklm} : decision variables for the corresponding subscripts (number of hectares to harvest).
A_{ijkl} : total area in hectares for the corresponding subscripts.
ZA_i : total area in hectares for management zone i.
γ_{ijklmp} = 1 if cut area for the corresponding subscripts under management regime m > 0 in period p.
 = 0 if cut area for the corresponding subscripts under management regime m = 0 in period p.
α, β : allowable variation constants.

는 미래 임분들은 營林計劃例規集(山林廳)에서 제시하는 벌기령-참나무류 50년, 소나무 60년, 잣나무 60년, 리기다 소나무 40년, 낙엽송 50년-에 벌채후 바로 갱신한다고 가정하였다.

이상에서 주어진 scenario를 전제로 분기별 벌채량의 증감율, 벌채면적 및 최저 생산재적과 같은 정책적 제약인자들을 동시에 만족시키며 경영 목적을 극대화하기 위한 Model I 및 Model II 선형계획 수식모형들이 Table 6 및 7에 나타나 있다. 이 표들에 보이는 수식모형들에서 목적함수는 계획기간 동안의 목재생산을 극대화 하는 것으로 정의되었다. Model I에서의 제약조건식들은 차례대로 각각 가용면적의 제약, 벌채면적

의 제약, 비감소수확 및 최저 수확재적의 제한을 의미하고, Model II에서는 각각 가용면적의 제약, 분기별 벌채면적과 갱신면적의 제한, 분기별 최저벌채면적의 제약, 비감소수확 그리고 분기별 최저 벌채재적의 한계를 의미한다.

사례분석 I : Model I 과 Model II에 의한 대상 산림의 최적경영분석

Model I 과 Model II의 수식화기법의 선택은 산림경영문제의 특성, 주어진 가정 혹은 경영자의 선호도에 의해 달라질 수 있고, 어떤 기법을 사용하는가에 의해 문제의 성격이나 모형의 크기가 달라질 수 있다. 특히 수식모형 크기는 최적해를 계산하는데 요구되는 계산시간 및 비용과

Table 7. Model II problem formulation

$$\begin{aligned}
 \text{Max. } Z &= \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^5 \sum_{l=-10}^{20} \sum_{m=1}^{20} c_{ijklm} \cdot X_{ijklm} \\
 \text{subject to} & \\
 \sum_{m=1}^{20} X_{ijklm} &= A_{ijkl} && \text{for all } i, j, k, l. \\
 \sum_{k=1}^5 \sum_{l=-10}^{20} X_{ijklm} - \text{TCA}_{ijm} &= 0 && \text{for all } i, j, m. \\
 \sum_{k=1}^5 \sum_{m=1}^{20} X_{ijklm} - \text{TCA}_{ijl} &= 0 && \text{for all } i, j, l. \\
 \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^5 \sum_{l=-10}^{20} v_{ijklm} \cdot X_{ijklm} - H_m &= 0 && \text{for all } m. \\
 \sum_{j=1}^3 \text{TCA}_{ijm} &\leq \beta \cdot \text{ZA}_i && \text{for all } i, m \\
 H_m &\geq \text{BV}_m && \text{for all } m. \\
 H_m - \alpha \cdot H_{m-1} &\geq 0 && (m = 2, 3, \dots, 20)
 \end{aligned}$$

Z : objective value (total harvest volume for the planning horizon in cubic meters).
 H_m : total harvest volume in period m .
 BV_m : lower bound constant for the minimum harvest volume in period m .
 v_{ijklm} : per hectare harvest volume in cubic meters for management zone i , site quality index j , species k , planting period l , cutting period m .
 c_{ijklm} : objective function coefficients for the corresponding subscripts.
 X_{ijklm} : decision variables for the corresponding subscripts (number of hectares to harvest).
 A_{ijkl} : total area in hectares for the corresponding subscripts.
 ZA_i : total area in hectares for management zone i .
 α, β : allowable variation constants.

密接한 관계가 있으므로 어떤 모형이 주어진 문제에 적합한가는 對象山林을 경영하는데 있어서 어떤 방법이 경영방침을 충분히 반영할 수 있는가에 의해 결정되어야 한다. 일반적으로 Model I에 의한 선형계획수식이 Model II에 의한 수식보다 많은 수의 意思決定變數들을 필요로 하고 적은 수의 제약조건식들을 필요로 한다. Johnson, 1977; 權五福과 張哲洙, 1988)고 되어 있으나 Johnson(1977)이 보고한 바와 같이 그러한 원칙은 문제의 조건이나 가정에 의해 좌우된다고 할 수 있다. 이 연구에서 제시된 문제를 Table 6과 7에 의한 선형계획수식 모형에 의해 수식화 하면 Table 8의 하단부에 나타난 것과 같이

Model I의 경우 Model II에 비해 요구되는 의사결정변수와 제약조건의 수가 각각 708개, 236개가 적은 것으로 나타났다.

Fig. 2(a)에서는 Table 8의 상단부에 나타난 제약조건을 적용했을 때 두 방법에 의한 최적목재수확계획이 분기별로 나타나 있다. 두 경우 모두 제 1분기의 재적생산량이 다른 분기들에 비해 극히 적게 나타난 것은 전술한 바와 같이 현재의 임상이 주로 3, 4영급에 분포되어 벌기령에 달한 임분이 거의 없기 때문이다. 반면 제 2분기부터 수확량이 급속히 늘어 目標林에 도달하여 비교적 안정된 목재생산이 이루어짐을 알 수 있다.

반면 Model I에 의해 계산된 각 분기별 수확

Table 8. (a) Regulation intensities used to formulate the Model I and Model II problems; (b) Sizes of Model I and Model II formulations generated by the matrix generator of the LP system

		Model I	Model II	Differences
(a) Regulation Intensities				
NDY conversion strategies	(%)	95	95	-
Period. allow. cut area	(%)	25	25	-
Period. min. vol. supply	(%)	-	-	-
(b) Formulation Sizes				
No. of decision variables		700	1,408	708
No. of constraints		188	424	236

Table 9. Scenarios to examine the effects of change in timber harvesting regulation intensities on optimal timber production schedules.

No.	Regulation types	Levels of regulation intensities		
		Low	Medium	High
1	NDY Conversion strategies (%)	-	70	95
2	Period. allow. cut area (%)	-	25	10
3	Period. min. vol. supply (m ³)	200,000	250,000	270,000

량은 Model II에 의한 수확량보다 적은 경향을 보이고 있다. 이것은 Model I에서는 계획초기의 임분특성에 의해 경영분석단위가 정해지면 전체 경영계획 기간동안 조림수종에 변동이 없는 반면에 Model II에서는 그러한 암묵적인 제약이 없이 매분기마다 목적함수를 극대화하기 위해 벌채임분의 수종을 선택하여 갱신하므로써 경영분석단위를 再編成할 수 있기 때문이다. 또한 이러한 이유로 인하여 Model II에서는 제 2,3분기에서의 초기 수확량이 Model I에 비해 특히 크다고 할 수 있다. 즉, 분기별로 벌채면적에 대한 수종갱신이 가능한 경우 임분의 영급이 벌기령에

도달하는 즉시 벌채하고 보다 생장속도가 빠른 수종을 갱신하는 것이 목적함수를 극대화하는데 유리하기 때문이다. 이러한 결과 Model II에 의한 계획기간 동안의 총재적생산량이 Model I에 의한 결과보다 739,161m³ 만큼 많은 것으로 나타났다(Fig. 2(b)).

사례분석 II : 목재생산에 대한 제약조건의 강도에 따른 영향력 분석

Table 9에는 모델의 適用例를 제시하기 위한 경영분석 문제들의 제약인자들의 강도가 주어져 있다. 연구목적상 각 경우에 대한 기본제약은 非減少收穫 制約條件의 強度는 70%, 분기별 허용

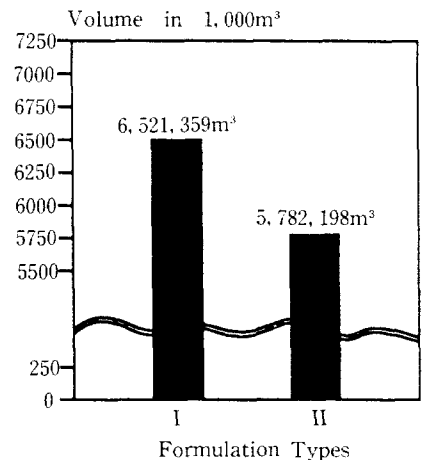
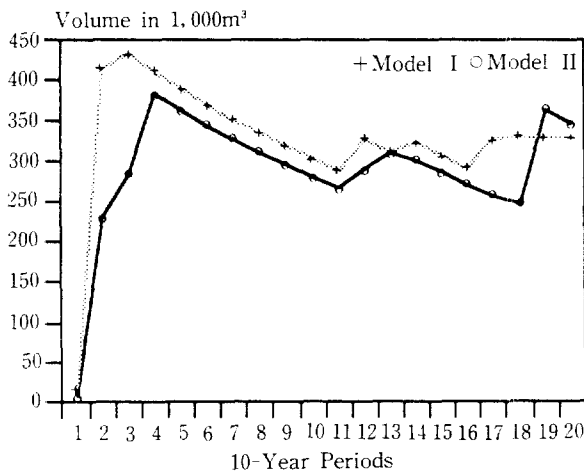
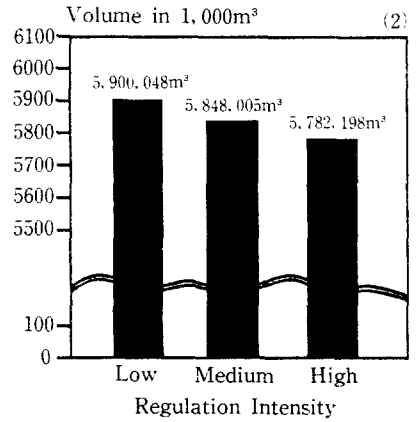
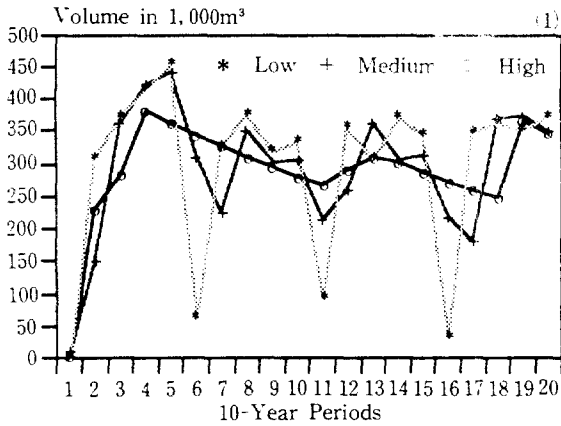
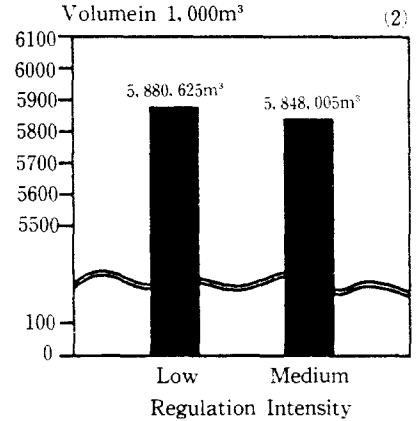
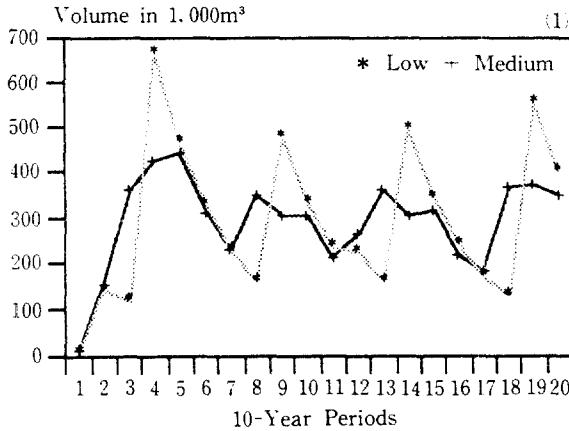


Fig. 2. The timber production schedules and the corresponding objective function values resulted from Model I and Model II formulations.

a) Effects of changes in allowable harvest flow conditions



b) Effects of changes in periodic allowable cut area



c) Effects of changes in periodic minimum volume supply

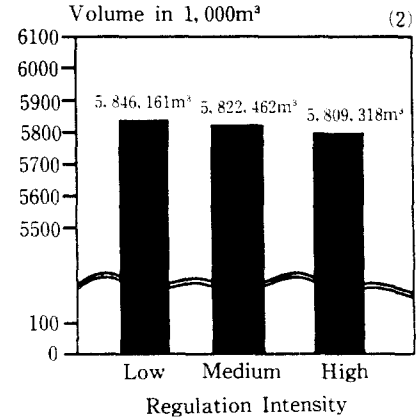
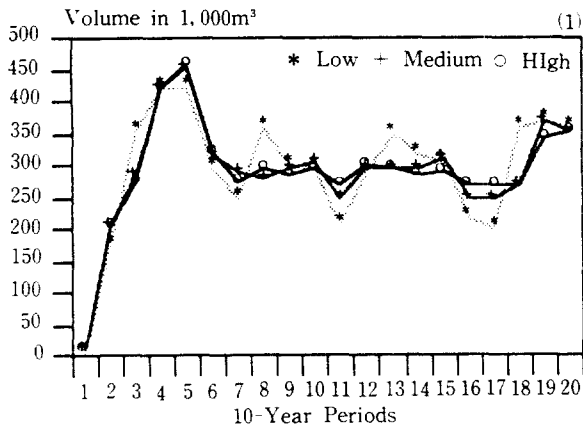


Fig. 3. The effects of changes in timber production regulation intensities on optimal timber production schedules over time and the objective values. The line curves and bar charts indicate optimal timber flows and objective function values, respectively.

벌채면적비율은 25% 그리고 분기별 최저 목재공급량의 제약은 없는 것으로 하였다. 즉, 표에서 첫번째 scenario는 기본제약으로부터 다른 조건은 변화시키지 않고 保續林 誘導을 위한 비감소수확 조건의 강도를 각각 95%, 70% 및 제약이 전혀 없는 경우로 변화시켰을 때 최적 경영계획에 대한 영향을 분석하고, 다른 두 경우에도 분기별 허용벌채면적비율 및 최저 목재공급량 제약의 변화가 목적값 및 최적해에 주는 영향을 비교 고찰하였다.

위의 3가지 경우에 대한 최적해에 관한 분석 결과가 Fig. 3에 나타나 있다. Fig. 3(a-1)은 scenario 1에 의해 각 분기의 벌채량을 직전 분기 벌채량의 95%, 70% 이상으로 제한한 경우와 비감소수확에 대한 조건을 고려하지 않은 경우 분기별 재적생산량의 변동을 나타낸다. 보속수확 제약조건 즉 수확감소를 제한을 강화시킬수록 시간에 따른 木材供給變動率의 폭이 급격히 줄어들어 보속수확체계에 접근함을 알 수 있다.

벌채면적을 제한하는 방법은 여러가지가 있을 수 있으나 본 연구에서는 분기별 벌채면적을 경영구역 면적의 일정비율 이하로 제한하도록 되어 있다. 벌채면적 비율을 scenario 2에서와 같이 제한했을 경우 시간에 따른 최적 수확벌채량의 변화는 Fig. 3(b-1)과 같다. 즉, 분기별 벌채면적을 구역면적의 25%로 제한하였을 경우와 벌채면적의 제한이 없는 경우를 비교하면 제한의 강도가 강할수록 분기별 재적생산량의 변동폭은 줄어들었다. 이러한 벌채면적의 제한은 비감소수확 제약조건과 같이 시간에 따른 벌채량을 제약하는 효과가 있으나 엄격한 의미의 보속림 유도를 기대하기는 어려울 것으로 판단된다. 한편 면적제한을 10%이내로 제한한 결과 불가능해가 나타났는데 이는 문제를 수식화할 때 적용한 '一循伐 以後에는 벌기령에 도달하는 즉시 벌채한다'는 기본전제와 상충되어 불가능해가 존재하기 때문으로 판단된다.

산림을 경영하는데 있어 여러가지 경영여건에 따라 경영자는 경영대상이 되는 산림에서 목표하는 목재공급량을 생산하거나 생산량의 최저한계를 설정할 수 있다. 가령 본 연구대상지에서 처음 6분기 동안은 빈약한 산림축적을 보육하기 위한 기간으로 적용하고 제 7분기부터 scenario 3에 나타난 축적 이상을 생산하고자할 경우 분기

별 재적생산량의 변동은 Fig. 3(c-1)과 같다. 200,000m³을 적용할 경우 제 17분기, 250,000m³인 경우 7, 11, 16, 17분기가 그리고 270,000m³을 적용할 경우 7, 11, 12, 16, 17분기의 재적생산량이 각각의 최저재적 이상으로 증가하지만 이들 분기의 전후 분기는 재적생산량이 감소하는 경향을 보이게 된다. 이는 최저재적생산량이 클수록 연속적인 재적생산량을 확보하기 위해 남겨두는 殘存 山林蓄積이 늘어나기 때문이다. 또한 본 연구대상지의 경우 최저재적이 270,000m³을 초과할 경우 불가능해가 존재함으로써 이 지역에서 보속생산을 위한 분기별 한계 생산력은 약 270,000m³정도인 것으로 판단된다.

한편 Fig. 3(a-2), 3(b-2) 및 3(c-2)에서는 제약조건의 강도에 따른 목적값 즉 계획기간 동안의 총재적생산량의 변동을 보여주고 있다. Fig. 3(a-2)의 경우 엄격한 보속 수확체계를 요구할수록 계획기간 동안의 총재적생산량은 줄어들어 제약조건이 0%에서 95% 수준까지 상승할 때 약 117,850m³의 목재생산량 감소가 뒤따르게 된다. 이러한 재적수확 감소량이 비감소수확 제약에 의한 보속림유도를 위해 감수해야하는 기회비용이 되며, 역시 다음 두 그림에서도 벌채면적의 제한 및 최저생산량의 공급 목표를 성취하기 위해 포기하게 되는 기회비용이 된다.

V. 結 論

경영계획은 과거나 현재의 현상파악을 통해 불확실한 미래에 관한 사업계획을 세우는 것이므로 바람직한 계획은 과거의 경험을 통해 미래를 예측하고 그 결과에 대한 분석을 토대로 가능한 모든 경영방안을 설정하고 경영목적에 가장 잘 부합하는 방안을 찾음으로서 가능하다. 따라서 주어진 경영여건과 경영목적은 충분히 고려할 때 보다 현실적인 경영계획안을 얻을 수 있다. 線型 計劃法은 현재의 경영여건 및 경영목적보다 폭넓게 반영할 수 있으며 불확실한 미래의 경영여건 등에 대한 感應度 分析이 용이 하여 다른 기법들에 비해 大規模 山林의 多目的經營 分析에 適合한 것으로 판단된다. 본 연구에 의해 제시된 전산모델은 실험적인 모델로서 여러가지 정책적 제약조건을 동시에 만족시키며 현존산림을 보속적 생산체제로 유도할 수 있는 최적 장, 단기 목

재생산계획을 제시하고 그에 따른 감응도 분석을 통해 최적경영계획에 대한 타당성 분석 및 결과 예측을 가능하게 할 것으로 기대된다. 그러나 본 연구에서는 제시된 전산모델의 적용성 검토가 약 11,000ha의 서울대학교 남부연습림에 국한되어 실행되었으므로 대규모 산림자원에 대한 반복적인 적용과정을 통해 수정·보완되어야 할 것이다. 다음 단계의 연구는 제시된 실험모델의 실용화를 위한 연구가 진행될 예정이다.

謝 辭

이 연구는 1992년도 山林廳의 지원을 받아 수행된 연구 결과의 일부로서 그동안의 지원에 감사드리고, 또한 본 논문내용중 減反率法에 관한 문헌고찰에 많은 도움을 주신 경상대학교 김의경 교수께 깊은 감사를 포함합니다.

引用 文 獻

1. 權五福·張哲洙. 1988. 森林經營計劃 모델의 適用性研究 - Model I 대 Model II. 韓林地 77(4) : 383-389.
2. 權五福·張哲洙·梁允碩. 1989. 森林經營計劃 모델의 適用性研究 : FORPLAN 構造. 韓林地 78 : 1-10.
3. 金東春. 1967. 日本일갈나무 林分の 收穫과 生長에 關한 研究. 林試研報 13 : 1-61.
4. 金東春·李興均. 1966. 갯나무 林分の 收穫 生長에 關한 研究. 林試研報 12 : 1-22.
5. 禹鍾春. 1991. Linear Programming에 의한 森林經營計劃 - 갯나무 林分の 森林收 穫計劃을 중심으로 -. 韓林地 80 : 427-435.
6. 俞鎮禹·沈東燮·盧奎亨·朴贊雨·李興均·金思日. 1986. 갯나무, 상수리나무 林分의 收穫과 生長에 關한 研究. 林試研報 33 : 13-34.
7. 俞鎮禹·盧奎亨. 1987. 신갈나무 林分의 收穫과 生長에 關한 研究. 林研研報 34 : 1-11.
9. 崔鍾天·南雲秀次郎. 1987. 民有林 經營計劃에 關한 研究 - 地域森林計劃에 있어서 木材 生産豫測 - 韓林地 76(4) : 390-396.
10. 岡和夫·熊崎實·飯田繁·天野正博. 1984. 國產材 供給システム計量モテ “ル開發調査報告書. - 地域モテ” ルの衞丘開發-. 日本林野廳 企劃課.
11. 鈴木太七. 1963. 木材의 生産豫測について (II) - 林業에 於 收穫豫定의 數學的 研究. - 科學技術廳資源局.
12. 松下幸司. 1987. 森林計劃にする 研究. 京都 大學博士學位論文.
13. Johnson, K.N. and P.L. Tedder. 1983. Linear Programming vs. Binary Search in Periodic Harvest Level Calculation. Forest Sci. 29 : 569-582.
14. Johnson, K.N. and T.W. Stuart, and S. A. Crim. 1986. FORPLAN Version 2 : An Overview. USDA Forest Service.
15. Walker, J.L., 1976 : ECHO : Solution Technique for a Nonlinear Economic Harvest Optimization Model. in J. Meadows, B. Bare, K. Ware, and C. Row (Eds.), "Systems Analysis and Forest Resource Management," Society of American Forestry, Washington, D.C.