

炭素貯藏 및 木材生産效果 中心의 山林經營計劃을 위한 多目的 線型計劃法의 應用^{1*}

朴恩植² · 鄭主相²

Optimal Forest Management Planning for Carbon Sequestration and Timber Production Using Multiobjective Linear Programming^{1*}

Eun Sik Park² and Joo Sang Chung²

요 약

이 연구에서는 탄소저장 및 목재생산효과를 동시에 고려하여 최적 산림경영계획을 수립하기 위한 다목적 선형계획수식모형을 개발하고, 사례연구를 통해 탄소저장과 목재생산효과의 선호도에 따른 최적 산림수확계획의 변화 경향을 분석하였다. 연구대상지로는 홍천의 가리산 지역을 선정하였으며, 선형계획수식모형에는 비감소수확, 수확벌채량 및 수확면적의 최대, 최소범위, 계획기간말의 임상구조 등을 제약하는 다수의 조건들을 포함시켰다. 또한 탄소저장 및 목재생산효과와 같이 상충적인 요소를 경영계획에 반영하기 위한 합리적 절충방안의 하나로 경영목적의 선호도에 따른 결합생산가능곡선을 제시하였다.

ABSTRACT

In this study, the multiobjective linear programming (MOLP) formulation was built to solve for the optimal forest management planning considering carbon sequestration and timber production simultaneously. The formulation was applied to a case study problem to investigate the trends of the optimal forest harvest schedules as the function of preference of forest management for carbon sequestration and timber production. The study site was Mt. Kari area in Hongchun. The formulation includes several site-specific constraints for non-declining yields, upper and lower bounds of cut volume and area for timber, ending inventory conditions, etc.. According to the changes of weight combinations for timber production and carbon sequestration, the joint production possibilities curve was proposed as the option for management choice.

Key words : Forest Management Planning, Multiobjective Linear Programming, Carbon Sequestration, Timber Production.

서 론

과거 수 백년 동안 산림은 목재와 몇몇 산림부 산물을 생산하는 중요한 경제적 기반이었다. 그러나 급속한 산업 발전과 인구의 폭발적 증가로 인해 지구 온난화, 오존층의 파괴, 열대림의 황폐화

등과 같은 심각한 환경문제가 발생하면서 산림의 활용방안에 대한 새로운 논의가 이루어지고 있다. 특히 1992년에 열린 유엔환경개발회의(UNCED)에서는 '환경적으로 건전하고 지속 가능한 개발(ESSD)'의 개념을 바탕으로 산림관리의 기본 원칙인 '산림원칙'을 채택하였다. 이는 앞으로의 산

¹ 接受 2000年 3月 23日 Received on March 23, 2000.

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

* 본 연구는 농림기술개발사업 지원에 의한 연구결과의 일부임.

림관리가 산림이 갖는 다양한 기능의 조화를 강조하는 추세로 전개되고 있음을 말해준다.

이와 같은 산림을 둘러싼 사회적 요구의 변화는 산림경영분야에서도 많은 변화를 불러오고 있다. 지금까지 산림경영의 근간을 이루던 물질생산중심의 경영체계가 갖는 문제점에 대한 반성과 함께 이를 극복하기 위한 새로운 형태의 개념이 도입되기 시작하였다. 즉, 산림에서 전통적으로 행해지던 목재생산 뿐만 아니라 자연생태계의 보전, 종다양성의 확보, 탄소저장 등과 같은 환경, 생태적 관리를 보다 적극적으로 수용하려는 노력이 진행되고 있다. 실제로 이미 외국에서는 계획수립 과정에 야생동물(Roise 등, 1990), 생물다양성(Louise 등, 1997), 탄소저장(Kershaw 등, 1993), 수자원(Lynn, 1997)과 같은 요소들을 고려한 연구들이 활발하게 이루어지고 있다.

한편 국내에서도 산림의 다목적 경영에 대한 개념이 많이 거론되고 있다. 다목적 산림경영은 대면적의 산림에 대한 종합 계획의 성격을 지닌다는 점에서 그 규모가 방대하고, 매우 복잡한 속성을 갖는 것이 일반적이다. 따라서 이러한 문제를 풀기 위해서는 자료전산처리기법 등의 도입이 필히 요구된다. 그러나 문헌고찰에 의하면 국내 연구에서는 이러한 방법론의 개발에 관한 연구가 미진한 것이 사실이다. 조응혁(1978), 우종춘(1991), 정주상과 박은식(1993)의 연구에서 보듯이 산림경영문제에 선형계획법을 적용하여 과학적인 산림계획을 수립하고자 한 연구들이 있었으나 대개 목재생산을 극대화하기 위한 산림수확조절 연구에 중점을 두고 있다. 이외에도 박은식과 정주상(1999)은 비감소수확, 토사유출제한 등을 정책적 제약조건으로 하여 산림의 목재생산과 탄소저장 효과를 개별적으로 극대화하고 그에 따른 임상구조의 변화 등을 비교, 분석하는데 그치고 있다. 따라서 상충되는 여러 가지 산림경영목표를 동시에 고려하여 다목적 산림경영의 개념을 구현하기 위한 연구는 거의 없었다고 볼 수 있다.

이러한 관점에서 이 연구에서는 기존의 산림수확조절을 위한 선형계획수식모형을 토대로 다목적 경영을 구현하기 위한 방법에 관한 연구를 수행하고, 그 결과를 제시하였다. 즉, 산림의 기본 기능에 속하는 목재생산과 탄소저장 두 가지 기능을 선형계획수식의 목적함수로 선정하고, 두 가지 기능을 동시에 고려할 수 있는 다목적 선형계획수식모형을 제시하여 그 응용성을 검토하였다.

연구방법

1. 다목적 선형계획법

산림자원관리계획의 수립을 위해 다목적 의사결정법의 하나인 다목적 선형계획법(multiobjective linear programming)을 적용하였다. 다목적 선형계획법에서는 비열등해(noninferior solution)를 구하는 방법에 따라 가중치법(weighting method), 제약조건법(constraint method), NISE법(noninferior set estimation method), 다목적 단체법(multiobjective simplex method) 등으로 구분할 수 있으며, 이 연구에서는 가중치법을 적용하였다. 이 방법은 목적함수의 계수를 변화시키면서 가능해 영역의 경계선이라 할 수 있는 비열등해들을 찾는 방법이다(Cohon, 1978).

가중치 적용에 의한 다목적 선형계획법은 아래의 3가지 수식모형을 이용하여 설명할 수 있다. 즉, 수식모형 [1]과 [2]는 각각 목재생산 극대화 혹은 탄소저장효과 극대화 와 같은 단일 평가기준을 적용하기 위한 수식모형이다. 이 수식을 풀게되면 각각의 기준에 따라 최적해가 결정될 수 있으나 평가기준이 상충되는 경우 동일한 산림에 두 개의 상이한 계획이 제시되는 모순이 있다. 이러한 어려움을 해결하기 위해 각각의 경영기준 혹은 목표에 상대적인 선호도(preferance)를 가중치(w_1 , w_2)로 부여하여 수식모형을 풀게되면 두 가지 평가기준을 동시에 고려한 최적해를 구할 수 있다. 또한 가중치의 조합을 변화시킴으로써 각각의 선호도에 따른 비열등해 곡선을 찾을 수 있으며, 이 곡선이 두 가지 경영목표를 동시에 추구할 때 나타날 수 있는 결합생산가능곡선(joint production possibilities curve)이 된다.

$$\begin{aligned}
 & [1] \text{ Max. } C_1X & & [2] \text{ Max. } C_2X \\
 & \text{s.t. } \begin{cases} AX \leq B \\ X \geq 0 \end{cases} & + & \text{s.t. } \begin{cases} AX \leq B \\ X \geq 0 \end{cases} \\
 & [3] \text{ Max. } W_1C_1X + W_2C_2X \\
 & \Rightarrow \text{s.t. } \begin{cases} AX \leq B \\ X \geq 0 \end{cases}
 \end{aligned}$$

2. 수식모형의 구성

Table 1과 Table 2는 각각 선형계획수식모형의 목적함수와 제약조건들을 정리한 것이다. 표에서 보듯이 대안의 평가 기준으로 계획기간 동안의 목

재생산량과 탄소저장량을 극대화하도록 하였으며, 그 하단부에는 두 가지 목적함수에 가중치를 부여한 다목적 선형계획 목적함수가 제시되어 있다. 산림경영을 위한 주요 제약함수로는 비감소 수확(NDY), 분기별 목재생산량, 벌채면적제한, 토사유출량 제한, 갱신수중조절, 분기별 탄소저장량, 계획기간말의 영급구성에 관한 경영인자들을 포함하고 있다. 수종별 임분의 생장, 탄소저장 및 토사유출 등과 같이 수식모형 구성에 요구되는 주요 생산함수는 박은식과 정주상(1999)에 의해 제시된 자료를 활용하였으며, 선형계획수식모형의 계산은 미국 Bionetics사의 C-Whiz 패키지를 이용하였다.

3. 연구대상지 및 경영방안

연구대상지로는 춘천관리소의 춘천영림구 가리산 지역 4,448ha을 선정하였으며, 자료는 해당지역의 산림조사자료를 이용하였다. 대상지역은 유역에 따라 크게 4개의 경영구역으로 세분하였으며, 대상지역의 영급구성은 IV영급이 전체 면적의 28%를 차지하여 가장 많았고, V영급은 2.6%에 불과하였다. 전체적으로는 II, III, IV영급이 각각 1,300ha 내외의 비교적 고른 분포를 보였으며, ha당 평균축적은 43.7m³/ha로 나타났다. 그리고 수종 구성은 활엽수 및 참목(활잡)이 전체 면적의 48%, 측적의 38%를 차지하여 가장 많았으며, 다음으로는 잣나무, 낙엽송, 신갈나무 등

Table 1. Types of objective functions

Objectives	Formulations	Description of Variables
Timber production	$Max Z = \sum_p VS_p$	VS_p = timber production in period p
Carbon storage	$Max Z = \sum_p CS_p$	CS_p = carbon storage in period p
Timber production and Carbon storage	$Max Z = W_t \sum_p VS_p + W_c \sum_p CS_p$	VS_p = timber production in period p CS_p = carbon storage in period p W_t = weight for timber production W_c = weight for carbon storage

Table 2. Constraint functions

Constraints	Formulations	Description of Variables
Nondeclining Yield	$H_i \geq (1 + \alpha) \cdot H_{i-1}$ $H_i \leq (1 + \beta) \cdot H_{i-1}$	H_i = timber production in period i α = allowable decreasing rate β = allowable increasing rate
Cut volume	$L_i \leq H_i \leq U_i$	U_i = lower bound of timber production at period i L_i = upper bound of timber production at period i
Cut area	$C_{ij} \leq \gamma \cdot A_j$	C_{ij} = cut area in ha for zone i at period j A_j = area of zone j in ha γ = % allowable cut rate in zone j
Soil erosion	$se_j \cdot C_{ij} \leq US_j$	se_j = soil erosion in ton/ha for zone j US_j = upper bound of soil erosion in zone j
Species selection	$P_{ijk} \geq \mu \cdot C_{ij}$	P_{ijk} = plantation area in ha for zone j , species k at period i μ = % lower bound for plantation area
Carbon storage	$CS_i \geq LF_i$	CS_i = carbon storage in tons at period i LF_i = lower bound for carbon storage at period i
Ending inventory	$EA_{il} \geq LA_l$	EA_{il} = ending inventory for age class l in zone j LA_l = lower bound area for age class l

Table 3. Basic policy for forest management by the forest zone

Constraints	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4
Rotation (years)	base*	base*	base*+20	base*
% cut area by period	≤ 20%	≤ 20%	≤ 12%	≤ 3%
Cut volume after 10th period (m ³)	≤ 200,000	≤ 200,000	≤ 200,000	≤ 200,000
Soil erosion (ton/ha)	≤ 0.03	≤ 0.03	≤ 0.02	≤ 0.01
Carbon storage after 10th period (ton/ha)	≥ 400,000	≥ 400,000	≥ 400,000	≥ 400,000
Ending inventory by age class (ha)	≥ 100ha	≥ 100ha	≥ 100ha	-
% area for regeneration by species selection	5%~30%	5%~30%	5%~20%	-

* The minimum rotation age by species follows the guideline issued by the Korea Forest Service. This rotation is 70 years for *Pinus densiflora*, *Pinus koraiensis*, *Chamaecyparis obtusa*, *Quercus* sp.; 60 years for *Larix* sp., *Cryptomeria* sp.; 40 years for *Pinus rigida*; 20 years for *Populus* sp..

의 순서로 나타났다.

이 지역의 경영은 Table 3과 같이 구역에 따른 구역별로 제약강도를 적용하였으며, 전체 계획기간은 후계림의 임상변화를 분석하기 위해 10년 단위 20분기로 하였다. 그리고 수종별 벌기령은 영림계획운영요강(산림청, 1995)에서 제시하는 요존 국유림의 수종별 벌기령을 적용하였다.

결과 및 고찰

목적함수에 따른 최적 경영안의 차이를 분석하기 위해 동일한 제약조건하에서 목재생산량 극대화와 탄소저장량 극대화의 두 가지 개별 평가기준에 의한 최적 경영안을 각각 분석한 후, 목적함수의 변화에 따른 분기별 목재생산량과 탄소저장량을 비교한 결과가 Fig. 1에 나타나 있다. 그림에서 보듯이 분기별 목재생산량은 목재생산량을 극대화한 경우 현존 임분이 벌기령에 도달하는 3분기부터 증가하기 시작하여 5분기 이후부터는 일

정 수준을 유지할 수 있는 것으로 나타났으며, 탄소저장량 극대화의 경우에는 11분기 이후부터 일정한 목재생산 수준을 보이고 있다.

두 경우 모두 보속수확을 위한 목표림의 분기별 목재생산량 하한 값으로 주어진 약 20만m²에 근접하고 있음을 알 수 있으나 목적함수의 평가기준에 따라 내포된 의미에 차이가 있다. 즉, 평가기준이 목재생산 극대화인 경우에는 보속수확 단계에 접어들었을 때 해당 산림의 생산잠재력과 탄소저장 능력이 각각 제약조건으로 부여한 하한 값에 묶이지 않고 있다. 따라서 계획기간 동안 해당 산림의 분기별 목재생산 잠재력이 약 21만m² 수준임을 알 수 있다. 반면 탄소저장량을 극대화하는 경우에는 생산잠재력이 제약조건인 하한선인 20만m²에 묶이고 있어 11분기 이후의 탄소저장 효과가 제약조건에 영향을 받고 있다.

한편 목적함수에 관계없이 현존 활엽수 임분이 많이 남아 있는 계획기간의 전반부에는 분기별 탄소저장량이 상대적으로 높은 추세를 보이는 반면

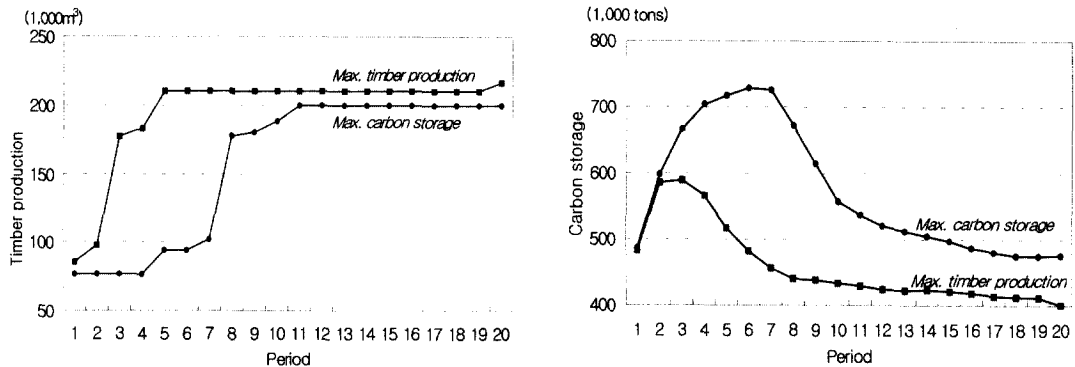


Fig. 1. The optimal trends of objective functions for maximizing timber production or carbon storage

점차 수종 갱신이 이루어지면서 후반부로 갈수록 낮아지고 있다. 이러한 결과는 산림수확과 연계되는 수종갱신 추이와도 연관이 있는 것으로 판단된다. 즉, 탄소저장량 극대화의 경우에는 전술한 바와 같이 분기별 목재생산량 제약조건에 의해 크게 영향을 받는 외에도 상대적으로 탄소흡수에 유리한 현존 활엽수림의 수확 및 갱신이 늦추어지는 것에 기인한다. 반면 목재생산량을 극대화하는 경우에는 초반에 현존 활엽수림의 성장에 의해 탄소저장량이 증가하지만 우선적으로 재적성장 효과가 낮은 활엽수를 벌채하고 침엽수로 수종갱신이 되기 때문에 시간이 갈수록 탄소저장 효과가 낮아지는 것으로 판단할 수 있다.

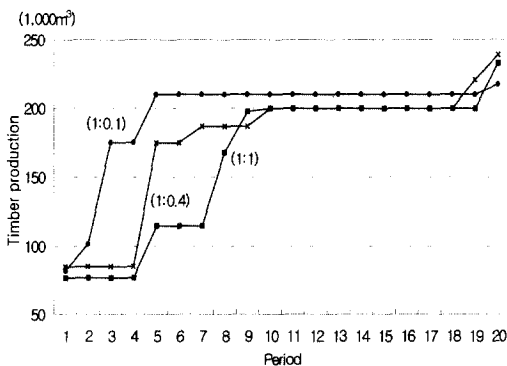
이상의 결과에서 산림경영의 정책적 목표가 목재생산량의 극대화 혹은 탄소저장량의 극대화인가에 따라 수확별체계획이 달라짐을 알 수 있다. 이는 두 가지 경영목표가 서로 상충될 수 있음을 의미하는 것이며, 이렇게 상충되는 목표를 어떻게 조정하여 합리적 산림계획을 수립할 수 있는가가 다목적 산림경영의 중요한 과제가 될 수 있다. 이러한 문제를 풀기 위해서는 경영목표들에 대한 상대적 선호도를 결정하여 적용함으로써 합리적 절충 방안을 모색할 수 있다. 가중치 적용에 의한 다목적 선형계획법에서는 Table 1에서와 같이 상대적 선호도를 가중치의 조합(w_1, w_2)으로 표현하여 적용함으로써 이러한 문제를 정량적으로 해결할 수 있도록 해준다.

그 예로 Fig. 2는 목재생산량의 선호도를 가중치 1.0으로 놓고, 탄소저장량의 가중치를 0.1, 0.4, 1.0인 3가지로 변화시켜 최적해를 계산한 결과를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 가중치 조

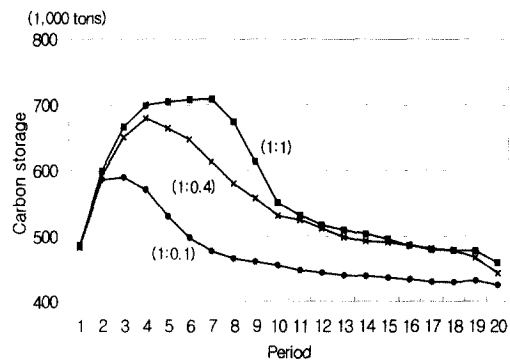
합의 변화에 따라 목재생산량 및 탄소저장량의 추이가 달라짐을 알 수 있다. 즉, 목재나 탄소 어느 한가지의 상대적 선호도(혹은 가중치)가 클수록 수식모형의 목적함수 값에 대한 기여도가 커지므로 Fig. 1에 나타난 분기별 수확량 혹은 탄소저장 곡선에 접근하게 된다. 이것은 목재생산이나 탄소저장 효과와 같은 단일 평가기준에 의한 수식모형이 다목적 수식모형에서 가중치를 (1,0) 혹은 (0,1)의 극단적 조합으로 적용한 경우에 해당하기 때문이다.

Fig. 2에서와 같이 가중치의 조합을 달리하는 경우 산림경영계획 수립은 많은 영향을 받게 된다. 일례로 Fig. 3은 Fig. 2에 나타난 수확조정방안에 따른 수종갱신의 내용을 보여주고 있다. 즉, 목재생산과 탄소저장에 대한 상대적 가중치의 조합이 변화함에 따라 수확 및 갱신의 내용도 달라지고 있다. 이 그림에 의하면 탄소저장량의 가중치가 증가함에 따라 전체 조림면적이 감소하는 경향을 보이고 있는데 이것은 산림의 탄소저장량을 높이기 위해 산림수확을 자제하는 것이 유리하기 때문이다. 또한 탄소저장량의 가중치가 증가함에 따라 수확갱신 면적이 줄어들어도 불구하고 활엽수의 조림면적은 상대적으로 증가하는 추세이다. 이것은 일반적으로 활엽수는 침엽수에 비해 전건비중이 높은 관계로 탄소저장 효과가 높은 것에 기인한다.

한편 서로 상충되는 산림경영 목표에 대한 합리적 조정을 위해 가중치의 조합을 어떻게 설정할 것인가? 이러한 물음에 답하기 위해서는 두 가지 경영 목표의 성취도에 따른 상호 관계를 이해하는 것이 중요하고, 이를 위해 결합생산가능곡선(joint



(a) timber production



(b) carbon storage

Fig. 2. The optimal trends of objective functions associated with weight combinations

Fig. 3. The effects of weight combinations on plantation area and species over time

production possibilities curve)을 활용하는 것이 효과적이다. Fig. 4는 가중치 조합을 변화시킬 때 목적함수 값에 포함되는 목재생산량 및 탄소저장량을 별도 추출하여 결합생산가능곡선으로 표현한 것이다(이 그림에서 목재생산에 대한 가중치는 1.0으로 고정하였으며, 탄소저장에 대한 가중치는 곡선상에 나타나 있다). 이 그림에서 보듯이 두 가지 경영목표중 어느 한 쪽의 상대적 가중치가 높아질수록 생산효과가 커짐을 알 수 있다. 산림경영을 위한 의사결정자는 이러한 곡선상의 한 점을 선정함으로써 그 점에 해당되는 구체적인 산림계획계획을 결정할 수 있다. 다만 이러한 곡선에서 어떤 점을 선정할 것인가는 결국 의사결정자의 정책적 판단에 의해 좌우될 수 있을 것이다.

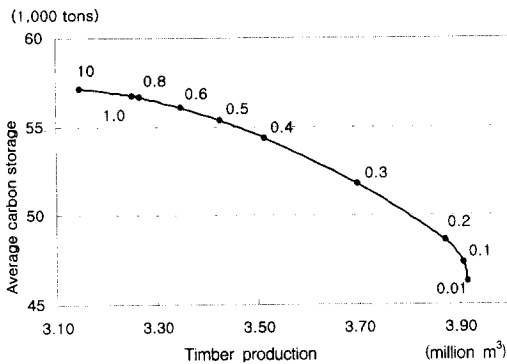


Fig. 4. The joint production possibilities curve for timber production and carbon storage when the weight for timber production is fixed to 1.0

결론

이 연구에서는 목재생산의 극대화 및 탄소저장의 극대화와 같이 두 가지의 상충되는 산림경영목적 추구하기 위한 적정 산림계획을 수립하기 위한 방안으로 가중치를 활용하는 다목적 선형계획법을 제시하고, 그 응용성을 검토하였다. 연구목적상 선형계획수식모형의 제약조건으로 비감소수확, 분기별 수확량, 최소 탄소저장량, 계획기간 말의 영급구조, 조림수종의 선택 등 일반적으로 산림경영에서 다루어 질 수 있는 정책적 목표들을 선정하여 적용하였다. 개발된 선형계획수식모형을 홍천군에 위치한 가리산 일대의 산림에 적용하여 사례연구를 통해 다목적 선형계획법의 응용성을 검토하였다. 그 결과 제시된 최적 산림수확계획 대안들에 대해 목적함수와 연계한 해석을 하고자 하였으며 최종적으로 결합생산가능곡선을 제시하였다. 이 연구를 통해 제시한 가중치별 목재생산량과 탄소저장량은 연구대상 산림에서의 공급 가능량을 의미하며, 여러 가지 경영안을 평가하는 수단으로 활용될 수 있다. 또한 이 연구에서 제시한 결합생산가능곡선은 상호 상충되는 경영목표들이 존재하는 경우 산림경영계획 수립에 요구되는 의사결정을 위한 판단자료로 활용될 수 있을 것이다. 다만 이 연구에서는 재적과 탄소저장만을 고려하였으나 산림자원 관리에는 생태적 측면이나 환경적 측면의 다양한 요인들이 중요하게 작용하고 있으므로 이러한 인자들을 보다 효과적으로 계획 수립과정에 반영하기 위한 연구들이 필요할 것이다.

인용문헌

1. 박은식. 1998. 다목적 산림경영을 위한 산림 정보시스템의 개발과 적용. 서울대학교 박사학위논문.
2. 박은식·정주상. 1999. 다목적 산림경영계획을 위한 선형계획법의 응용. 한국임학회지 88(2) : 273-281.
3. 산림청. 1995. 영림계획운영요강. 산림청 훈령집. 1455-1479p.
4. 우종춘. 1991. Linear Programming에 의한 산림경영계획-잣나무 임분의 삼림수확계획을 중심으로. 한국임학회지 80(4) : 427-435.
5. 임업연구원. 1989. 주요수종의 최적 벌기령에 관한 연구. 임업연구원 시험연구보고서 4-IV. 6-21p.
6. 임업연구원. 1994. 공무해외출장 귀국보고서 (온실가스 저감방안 및 평가. 미국). 29-30p.
7. 임업연구원. 1994. 한국산 주요 목재의 성질과 용도. 119-265p.
8. 임업연구원. 1996. 한국 산림과 온실가스. 55-79p.
9. 정주상·박은식. 1993. 대단지 산림의 목재생산계획 분석을 위한 선형계획 실험전산모델에 관한 연구. 한국임학회지 82(3) : 292-304.
10. 조용혁. 1978. 시스템분석에 의한 삼림수확조절에 관한 연구. 서울대학교 박사학위 논문.
11. Cohon. 1978. Multiobjective programming and planning. Academic Press. 68-84p.
12. Kershaw, J. A., C. D. Oliver and T. M. Hincley. 1993. Effect of harvest of old growth douglas-fir stands and subsequent management on carbon dioxide levels in the atmosphere. Journal of Sustainable Forestry 1(1) : 61-77.
13. Louise, M. T. and L. W. Gary. 1997. Evaluating biodiversity of land units : scale, diversity, types, and stakes. Integrating Social Science and Ecosystem Management Proceeding 108-111p.
14. Lynn, A. M. 1997. Defining future forest conditions for the Chattooga basin : Methods and preliminary analysis. Integrating Social Science and Ecosystem Management Proceeding 14-19p.
15. Roise, J., J. Chung, R. Lancia and M. Lennartz. 1990. Red-Cockaded woodpecker habitat and timber management production possibilities. Southern Journal of Applied Forestry 14(1) : 6-12.