J. Korean For. Soc. Vol. 104, No. 4, pp. 649~656 (2015)
http://dx.doi.org/10.14578/jkfs.2015.104.4.649

한국임학회지
JOURNAL OF KOREAN FOREST SOCIETY
ISSN 0445-4650(Print), ISSN 2289-0904(Online)
http://e-journal.kfs21.or.kr

동적계획법 적용에 의한 삼나무 임분의 간벌시업체계 분석

한 희[1] · 권기범[1] · 정혜진[1] · 설아라[2]* · 정주상[1,2]
[1]서울대학교 산림과학부, [2]서울대학교 농업생명과학연구원

Analysis of Optimal Thinning Prescriptions for a *Cryptomeria japonica* Stand Using Dynamic Programming

Hee Han[1], Kibeom Kwon[1], Hyejean Chung[1], Ara Seol[2]* and Joosang Chung[1,2]
[1]*Department of Forest Sciences, Seoul National University, Seoul 08826, Korea*
[2]*Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul 08826, Korea*

요 약: 이 연구의 목적은 국립산림과학원 한남시험림의 삼나무조림지에서 목재 및 탄소 경영을 위한 최적의 간벌시업체계를 결정하기 위해 수행되었다. 이 문제를 풀기 위해 Paderes and Brodie에 의해 개발된 PATH 알고리즘을 의사결정 지원체계로 그리고 임분생장예측을 위해 권기범 등이 개발한 임분생장모델을 적용하였다. 이 임분생장모델은 개체목간의 거리에 대한 고려가 없이 임목의 고사나 간벌과 같은 임분밀도 조절 요인에 의한 생장효과를 예측할 수 있다. 분석 결과 순현재가를 극대화하기 위한 목재생산경영은 탄소흡수량을 극대화하기 위한 탄소경영에 비해 간벌의 횟수는 적었지만 간벌강도가 상대적으로 큰 값으로 나타났다. 탄소경영의 경우 목재생산경영에 비해 탄소흡수량이 약 6% 증가한데 비해 순수익은 약 3.2% 감소하는 것으로 나타났다. 한편 탄소경영이나 목재생산경영을 위한 집약적 경영은 무간벌 시업조건을 전제로 하는 '무간벌 대조구'의 경우에 비해 약 60% 정도의 탄소흡수 및 순수익 증진효과가 있는 것으로 나타났다.

Abstract: The objective of this study was to analyze the optimal thinning regimes for timber or carbon managements in *Cryptomeria japonica* stands of Hannam Experimental Forest, Korea Forest Research Institute. In solving the problem, PATH algorithm, developed by Paderes and Brodie, was used as the decision-making tool and the individual-tree/distance-free stand growth simulator for the species, developed by Kwon et al., was used to predict the stand growth associated with density control by thinning regimes and mortality. The results of this study indicate that the timber management for maximum net present value (NPV) needs less number of but higher intensity thinnings than the carbon management for maximum carbon absorption does. In case of carbon management, the amount of carbon absorption is bigger than that of timber management by about 6% but NPV is reduced by about 3.2%. On the other hand, intensive forest managements with thinning regimes promotes net income and carbon absorption by about 60% compared with those of the do-nothing option.

Key words: *dynamic programming, optimal thinning regimes, timber management, carbon management, PATH algorithm*

서 론

산림이 지니는 '탄소흡수원(Carbon sink)'으로서의 기능은 산림이 제공하는 주요한 생태계서비스(Ecosystem service) 중의 하나로서 오늘날 이를 정확히 계량하고 관리할 수 있는 방법에 관한 연구가 지역적·국가적 차원에서 활발히 이루어지고 있다.

임분 생장에 따른 탄소흡수 효과는 생태계의 생물적 · 비생물적 요소에 의하여 많은 영향을 받으며 변화한다. 특히 산림시업과 같은 산림경영활동은 산림의 동태를 변화시키며 임분 생장에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있어(Davis et al., 2001), 임분의 탄소 흡수 기능을 증진하기 위한 산림경영에서 간벌 · 주벌과 같은 산림시업의 적절한 시기 · 빈도 · 강도 등을 선택하는 것은 중요한 의사결정의 문제이다.

일반적으로 임분의 생장 특성이나 탄소흡수 기능은 임분의 특성이나 산림시업에 따른 다양한 변수의 복합적인 작용에 의해 민감하게 영향을 받는다. 이 모든 변수 간의

*Corresponding author
E-mail: araseol@hanmail.net

상호작용을 이해하고, 이를 통해 산림시업체계의 변화에 따른 임분 생장이나 탄소흡수 효과를 정량화하는 일은 쉽지 않다. 더욱이 정량화된 산림시업 효과를 기반으로 그 효과를 극대화하기 위한 최적의 산림시업체계를 찾는 일은 엄청난 연산과정이 요구되므로 매우 어려운 일이다.

하지만, 문헌고찰에 의하면 이미 1960년대 말부터 북미나 유럽 등에서 이 문제를 풀기 위하여 많은 연구가 이루어졌다. 그 예로, Chappelle and Nelson(1964)의 한계분석론(Marginal analysis), Näslund(1969)의 응용조절론(Applied control theory), Pelz(1977)의 재고관리론(Inventory theory) 등의 경제학적 이론을 응용하고자 하는 시도가 있었으나, 구체적인 간벌시업체계 결정방법론으로는 한계가 있었다.

이러한 경제학적 이론에 바탕을 둔 방법론을 대신하여 보다 현실적인 대안으로 1970년대부터 다양한 형태의 수리계획기법(mathematical programming)들이 임분단위 산림시업체계 결정을 위한 방안으로 개발되었다. 그 중에서도 동적계획기법(dynamic programming; DP)은 복잡한 비선형의 초월함수들로 구성되는 간벌 및 주벌시업 결정 모형의 최적해를 풀기위한 수리계획기법으로, Amidon and Akin(1968), Schreuder(1971) 등에 의해 제안되어 알고리즘의 개선을 통해 현재까지 임분단위 산림시업체계 결정에 효율적인 수리계획기법으로 활용되고 있다.

임분단위 산림시업체계 결정과 관련된 연구는 DP의 등장과 더불어 1970년대 후반부터 컴퓨터 hardware 및 software의 급속한 발달과 함께 임분의 생장예측을 위한 복잡하고 정교한 형태의 임분생장 예측 시뮬레이터(stand growth prediction simulator)들이 개발되면서 더욱 가속화된다. 수학적으로 최적의 산림시업체계 도출을 위해서는 시간의 흐름에 따라 변해가는 복잡한 임상조건의 변화와 그에 따른 생장효과, 복리산식에 의한 화폐가치의 변화 등을 동시에 반영해야 하는데, 이러한 관점에서 정교한 임분생장 예측 시뮬레이터의 개발과 DP의 응용으로 다양한 형태의 산림경영 목표를 반영하기 위한 산림시업체계의 최적해 도출(optimization)이 가능해진 것이다.

산림경영을 위한 임분단위 산림시업체계 결정에 DP를 활용한 연구는 Brodie and Kao(1979), Haight et al.(1985), Paredes and Brodie(1987), Yoshimoto et al.(1990), Arthaud and Pelkki(1996), Yoshimoto and Marušák(2007) 등을 그 사례로 들 수 있다. 특히 Paredes and Brodie(1987)는 라그란지안 승수(Lagrange multiplier) 활용에 의해 구조화된 PATH 알고리즘을 도입하여 임분단위 산림시업체계 결정연산속도를 크게 단축시킨 것으로 평가된다.

한편 국내에서는 임분단위 간벌시업체계 수립을 위한 응용모델 개발에 관한 연구가 거의 전무한 실정으로 Woo and Jang(2009)이 DP의 개념 소개를 위해 잣나무 임분의 간벌 pathway 선정에 관한 연구가 유일하다.

본 연구에서는 삼나무(*Cryptomeria japonica*) 임분경영에 Paredes and Brodie(1987)가 개발한 PATH 알고리즘을 적용하여 목재생산은 물론 최근 산림의 중요한 생태계서비스로 인식되는 탄소흡수기능 극대화를 위한 시업체계를 분석하고자 하였다.

간벌시업체계 결정을 위한 DP 알고리즘

1. 임분단위 시업체계 결정을 위한 DP

임분단위에서 최적의 간벌시업체계를 도출하기 위해서는 임분의 생장패턴과 간벌에 의한 임분의 생장변화를 효과적으로 반영할 수 있는 DP나 비선형계획기법(non-linear programming; NLP)과 같은 수리계획기법이 요구된다. 이 중 NLP는 비선형함수의 해를 결정함에 있어 최적해 도출과정이 수학적 원리에 보다 충실한 반면 많은 연산과정을 거쳐야 하는 부담이 있다. 반면, 동적계획기법은 이러한 연산과정을 보다 효율적으로 처리할 수 있도록 문제의 인위적 재구성 단계를 거쳐 최적해를 산출하도록 고안된 알고리즘이다.

즉, DP는 문제를 다단계로 분해(decomposition)하거나 합성(composition)하는 일련의 과정을 통해 의사결정의 선행단계에서 시작하여 순차적으로 선행단계(preceding stage)와 연속된 단계(following stage)를 순환적으로 밟아 전 과정(모든 단계)을 아우르는 최적해 결정방법이다(Bellman, 1957).

이러한 DP의 계산방법은 Bellman(1957)의 최적화의 원리(principle of optimality)로 알려진 순환 최적원리에 그 기초를 두고 있다. 최적화의 원리란 어떤 상태의 최적의사결정 규칙은 주어진 현재의 상태 하에서 남아 있는 단계들의 최적상태의 결정이 이전의 모든 단계에서 채택되어진 정책들에 종속되어지는 것이 아니라 바로 전 단계의 정책에 의해서만 최적화되어야 한다는 원리이다. 이것은 다 단계의 의사결정문제에서 어떤 상태의 최적 정책이 어떻게 하여 이 상태에 도달되었는가에 관계없이 독립적으로 현재의 상태에만 의존한다는 것을 의미한다(Miranda and Feakler, 2002).

이러한 원리가 Figure 1에 제시되어 있는 바, 이 그림은 일반적인 임분시업체계 결정을 위한 의사결정의 단계를 개념적으로 보여준다. 예를 들어, 목재생산 최대를 목표하기 위한 시업체계 결정에 있어 어느 시점에 어떤 강도의 간벌을 할 것인가가 주된 의사결정 문제가 된다.

Figure 1에서 어떤 시점, T1에 B 혹은 C의 간벌을 시행할 수도 있고, A와 같이 아예 간벌을 하지 않을 수도 있다. 결국 이 그림에서 보듯이, 이 시점, T1에서의 간벌 방침을 어떻게 결정하는가에 따라 미래 임분의 생장패턴이 달라진다. 그리고 T2 시점에도 마찬가지의 의사결정이 요구되

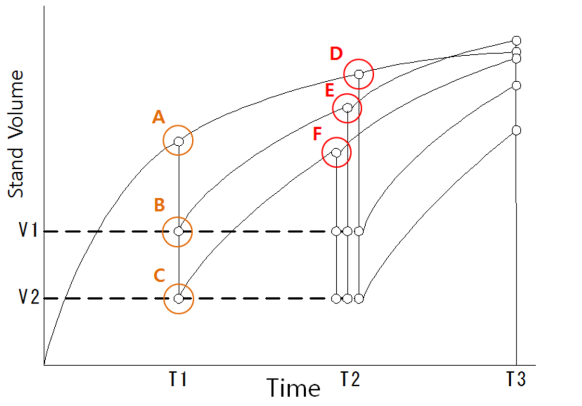


Figure 1. Life cycles of a stand associated with diverse thinning options.

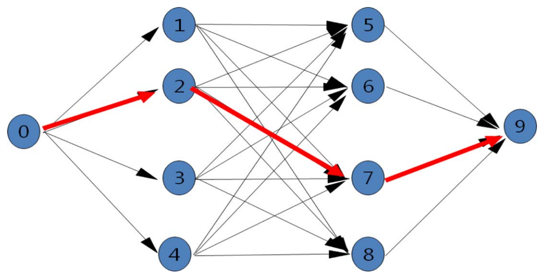


Figure 2. The optimal path found by DP.

며, 만약 우리가 더 많은 시점에 대한 간벌시업을 고려한다 해도 동일한 의사결정 과정을 거쳐야 할 것이다. 결국 이와 같이 다양한 간벌시업체계에 따라 궁극적으로 목재생산량이 달라질 수 있으므로 모든 가능성을 고려하여 목표하는 바를 성취하기 위한 최적의 산림시업체계를 찾아내는 것이 중요하다.

DP는 이와 같이 순환적으로 연결된 의사결정문제에서 계획된 목표를 최대로 달성할 수 있는 최적의 의사결정 경로(optimal path)를 매우 효율적으로 도출해 준다. Figure 2는 DP 모델을 구성하는 네트워크 안에서 선택된 최적의 의사결정 경로를 보여준다.

2. PATH 알고리즘

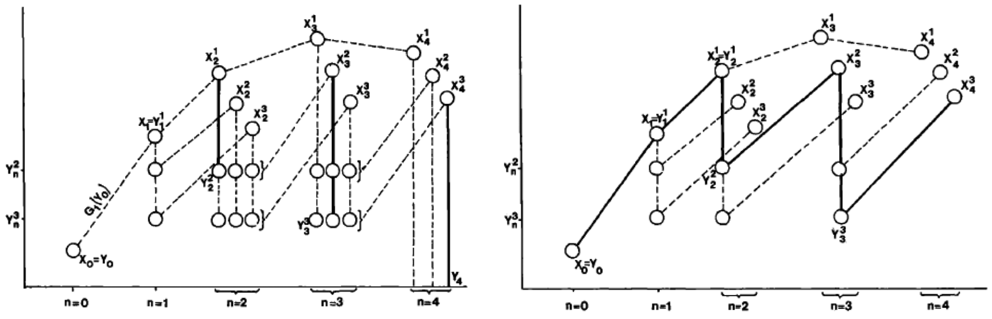
일반적으로 DP를 적용하여 임분단위 시업체계 분석을 수행함에 문제가 복잡해질 경우 최적해를 도출하기 위한 계산시간이 기하급수적으로 늘어나게 된다(Hann and Brodie, 1980). Paredes and Brodie(1987)는 이러한 문제를 해결하기 위하여 PATH(projection alternative technique) 알고리즘을 개발하여 복잡한 DP문제에서 요구되는 연산량을 최소화하고자 하였다.

Figure 3은 기존 DP에서 간벌시업체계 결정에 사용할 수 있는 범용적 알고리즘과 PATH 알고리즘을 비교하여 보여준다. 즉, PATH 알고리즘(Paredes와 Brodie, 1987)은 복잡한 동적 네트워크 상에서 목적함수의 최대값을 도출하는 최적 PATH를 매우 빠른 시간 안에 탐색할 수 있도록 Lagrange multiplier를 이용하여 문제를 구조화해 주는 기능이 있다. 이를 통해 가능해(feasible solution)의 수를 크게 줄여줌으로써 최적해 계산을 위한 연산량을 크게 절감해주는 효과가 있다.

연구방법

1. 분석 대상 임분

간벌시업체계 적용 대상지는 국립산림과학원 난대산림연구소 한남시험림에 위치한 총 217 ha의 삼나무 임분 중 31년생으로 Table 1에 해당 임분의 임상특성이 제시되어



(a) Conventional DP algorithm (b) PATH algorithm

Figure 3. Comparison between the traditional DP algorithm and PATH algorithm. Full Lines are arcs incorporated in the objective function, dotted lines are arcs used in recursion (Paredes and Brodie, 1987).

Table 1. Statistics of the *Cryptomeria japonica* forest stand.

Stand age (yr)	Site index (m)	No. of trees (trees/ha)	Ave. DBH (cm)	Ave. Ht (m)	Volume (m^3/ha)
31	14	1,225	18.1	13.3	208

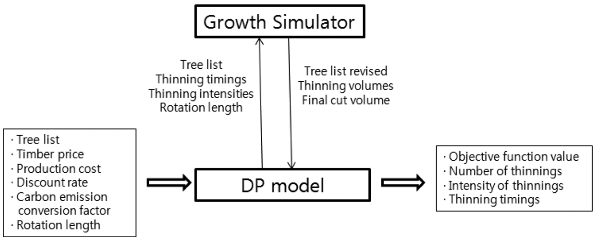


Figure 4. The sturcture of DP model.

있다. 이 임분은 평균흉고직경이 18.1 cm, 현실재적이 ha 당 208 m^3로 생장이 매우 왕성한 삼나무 인공림으로 집약적인 산림경영이 이루어지고 있다.

2. 분석 체계

본 연구에서는 동적 네트워크 상 최적의 path를 매우 효율적으로 탐색할 수 있는 PATH 알고리즘과 STEMS 기반의 임분생장예측 시뮬레이터(Kwon et al., 2013)를 결합하여 임분의 목재생산과 탄소흡수를 고려한 최적의 산림시업체계를 도출하고자 하였다. 이를 위한 모델의 구조가 Figure 4에 제시되었다.

3. DP 수식모형

본 연구에서는 PATH 알고리즘을 적용하여 목재생산에 의한 수익 극대화 및 임분의 탄소흡수 극대화 두 가지를 선별적으로 도출할 목적으로 집약적 산림시업체계의 주요 의사결정변수의 값을 결정하기 위한 수식모형을 수립하였다. 주요 의사결정변수는 개벌에 의한 동령림체계를 가정하여 간벌횟수, 간벌강도 및 간벌시기로 결정하였다.

$$f_i^* = \max\{f_i(T_i)\}$$
$$f_i(T_i) = \Pi_i(T_i) + V(T_i) - \Pi_{i-1}^*(T_{i-1}) + f_{i-1}^* \qquad (1)$$

$T_i = T(t_i)$: 간벌이 시행된 시점 t_i에서의 간벌량

$\Pi_i(T_i) = \Pi(x(t_{i+1}), T((t_i), t_{i+1}))$: 시점 t_i에서 잔존임분의 가치

$V(T_i) = V(T(T_i))$: 시점 t_i에서 시행된 간벌로 인한 가치

$\Pi_i^* = \Pi_i(T_i^*)$: 시점 t_i에서 임분의 최적 가치

f_i^* : 시점 t_i에서의 목적함수의 최적해

4. 임분생장예측 시뮬레이터

삼나무 임분의 생장예측은 Kwon(2013)이 개발한 제주도 삼나무 임분의 생장예측 시뮬레이터를 적용하였다. 이 시뮬레이터의 각 매개변수의 모형과 계수가 각각 Table 2와 Table 3에 제시되어 있다.

5. 탄소 전환함수

삼나무임분의 탄소흡수량은 아래 식 2를 적용하여 산출

Table 2. Parameters and functions of individual-tree growth simulator(Kwon, 2013).

Parameters	Equations form
Potential diameter growth function	$PG = b_0 - b_1\ DBH^{b_3} \times b_3 \times SI \times CR \times DBH^{b_4}$
Modifier function	$MOD = 1 - \exp\left(-[f(R) \times g(AD)] \times \left[\frac{BA_{max} - BA}{BA}\right]^{0.5}\right)$ were, $f(R) = b_0\left[1 - \exp\left(b_1 \times \frac{DBH}{AD}\right)\right]^{b_2} + b_3$ $g(AD) = b_4(AD+1)^{b_5}$
Crown ration function	$CR = b_0\left[\frac{1}{1 + b_1 BA}\right] + b_2[1 - \exp(-b_3 DBH)]$
Mortality function	$M = \frac{1}{1 + \exp(b_0 + b_1(PG \times MOD))^{b_2} + b_3 DBH} + b_4$

*AD = average DBH, BA= basal area, BA_{max}= maximum basal area

Table 3. The coefficients of parameters of the stand growth model (Kwon, 2013).

Functions	Coefficients						R^2
	b1	b2	b3	b4	b5	b6	
Crown ratio	0.6246	0.0663	0.6382	0.0318	-	-	0.72
Potential dia. growth	1.2	-0.016	1.1092	0.0014	1.0	-	0.55
Modifier	3.8847	-1.281	10.0669	0.8003	0.2897	0.4224	0.69
Mortality	1.1973	0.5397	-0.9719	0.0691	0.0115	-	0.64

Table 4. Carbon emission factors for *Cryptomeria japonica* (Korea Forest Research Institute, 2010).

Basic wood density (g/cm^3)	Biomass expansion factor	Carbon fraction
0.35	1.31	0.5

하였고, 이 때 사용된 삼나무의 탄소전환계수는 Table 4와 같다.

$$W^C = \rho_0 \times V_{stem} \times E \times C_0 \quad (2)$$

where, W^C : Carbon stock (Ct)

ρ^0 : Basic wood density (g/cm^3)

V_{stem} : Tree volume (m^3)

E : Biomass expansion factor

C_0 : Carbon fraction

6. 투자효율성 측정함수

간벌 및 주벌 등 산림시업에 따른 투자효율성(investment efficiency)은 다음의 순현재가(NPV: net present value)를 이용하여 산출하였다.

$$NPV = V_{stem} \times P/(1+i)^{n-n_0} - V_{stem} \times C/(1+i)^{n-n_0} \quad (3)$$

NPV : net present value (won)

P : timber price (won/m^3)

V_{stem} : stem volume (m^3)

C : thinning cost (won/m^3)

n_0 : present time

n : thinning age

7. 분석 시나리오의 구성

본 연구에서는 위의 식 1을 이용하여 연구대상지의 임분에 대해 산림시업을 하지 않는 '무간벌 대조구'의 경우를 상정하여 기본사례로 하였다. 또한 동일한 임분을 대상으로 산림경영 목표를 순수익의 극대화와 탄소 흡수 극대화로 구분하여 집약적 산림경영(intensive forest management)에 의한 최적해를 각각 도출하고 그 결과를 비교하였다.

각 시나리오 분석에 2014년 표준벌기령인 60년을 적용하였으며, 집약적 산림경영의 경우 간벌 횟수, 시기 및 강도를 의사결정변수로 하였고, 산림시업 시뮬레이션을 위한 간벌강도는 10% 간격 그리고 간벌시기는 5년 간격으로 분석하였다. 집약적 산림경영에 대한 목적함수는 경영목표에 따라 각각 순현재가 및 탄소흡수효과의 극대화로 구분하여 각각 최적해를 도출하여 비교하였다.

Table 5. Data for analyzing investment efficiency in timber management simulations.

Timber price (won/m^3)	Thinning cost (won/m^3)	Final-cut cost (won/m^3)
80,000	57,461	45,969

시뮬레이션에 사용한 벌채 및 원목 시장가 자료가 Table 5에 제시되어 있다. 원목 매매가는 2014년 제재소 기준으로 80,000원/m^3를 적용하였으며, 간벌 및 운재 비용은 산림조합에서 제시하고 있는 단위재적 당 표준비용인 57,461원/m^3을 적용하였다. 단, 주벌의 경우 일반적으로 간벌에 비해 생산성이 높은 것을 감안하여 단위재적 당 생산비용을 간벌의 80%로 책정하였고, 할인율은 3%를 적용하였다.

결과 및 고찰

1. 집약적 산림경영을 위한 최적 산림시업체계

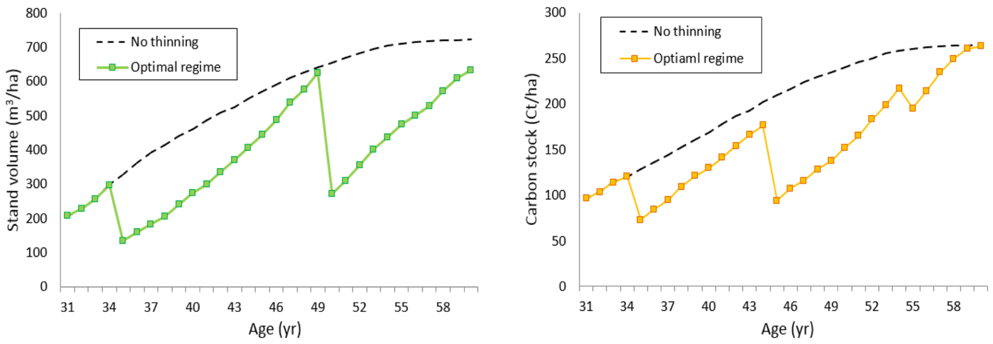
Table 6과 Figure 5는 탄소 및 목재경영을 위한 최적의 산림시업체계 분석결과를 보여준다. 수익 극대화 시뮬레이션의 경우, 임령 35년과 50년에 각각 40%, 50%로 총 2회의 간벌을 시행할 때 순수익이 ha당 약 1,641만원이었다. 반면 탄소 흡수량을 극대화하기 위한 시뮬레이션에서는 총 3회(임령 35, 45 및 55년)에 걸쳐 각각 30%, 40% 및 10%의 간벌을 하는 것이 최적이었으며, 목적함수 값은 약 1,588만원으로 나타났다.

Table 6에서 보듯이 원목 생산에 따른 수익을 추구하는 대신 탄소경영에 우선순위를 둘 경우 발생하는 기회비용은 ha당 53만원으로 최대수익의 약 3.2% 그리고 탄소흡수량의 차이는 19.1Ct/ha으로 약 6.9%의 차이가 발생한다.

이와 같은 경영목표 별 간벌시업체계 결정에 따른 차이는

Table 6. Optimal solutions for the timber and carbon managements.

Parameters		Stand management options					
		Max. profit		Max. carbon absorption			Difference
Thin	No. of times	2		3			-
	Stand age (yrs)	35	50	35	45	55	-
	% intensity	40	50	30	40	10	-
NPV (won)		16,409,095		15,879,805			529,290
Carbon stock (Ct/ha)		257.1		276.2			-19.1



(a) Max. profit for timber management (b) Max. carbon absorption

Figure 5. Changes in the stand volume over time associated with optimal thinning regimes for timber and carbon managements.

의사결정 방식의 차이에서 비롯된다. 즉, 탄소전환함수 2를 검토해 보면 탄소흡수량 극대화는 현재의 임분이 주벌시기에 도달할 때까지 간벌 및 주벌에 의해 생산할 수 있는 목재생산량을 극대화함으로써 얻어진다. 따라서 임분경영에 의한 탄소흡수량의 극대화는 임분생장 시뮬레이터를 활용하여 목재생산량을 극대화할 수 있는 간벌시업체계를 결정하면 된다.

반면 임분경영에 따른 수익성은 임분의 생장특성 외에 투자효율성 측정함수 3의 영향을 동시에 받는다. 따라서 수익성을 극대화하기 위한 최적의 간벌시업체계를 결정하기 위해서는 임분생장 시뮬레이터를 활용하여 목재생산량을 증가시킬 수 있는 방안을 모색하는 것도 중요하다. 동시에 투자효율성 측정함수 3를 활용하여 간벌 혹은 주벌 시기에 발생하는 비용이나 수입을 현재가(present value)로 할인하는 효과를 감안하여 최적 간벌시업체계를 결정해야 하므로 목적함수 값에 차이가 발생하는 것이다.

한편 집약적 산림경영에서 Table 6에 제시된 결과만을 가지고 수익성 관점에서 산림시업체계를 선정한다면 탄소 시장가에 의해 좌우될 수 있을 것이다. 즉, Table 6의 2가지 산림시업체계만을 고려할 때 탄소거래 시장가가 27,711원/Ct이면 탄소흡수량 극대화가 수익성 극대화와 같은 수익을 줄 수 있다. 따라서 탄소거래 시장가가 27,711원/Ct 이상이면 탄소흡수량을 극대화하는 산림시업체계가 그리고 그 이하인 경우에는 수익극대화를 위한 산림시업체계가 수익성 측면에서 유리하다고 볼 수 있다.

2. 경영목표에 따른 간벌시업의 효과 비교

Figure 6에 의하면 목재경영 혹은 탄소경영을 위한 집약적 산림경영의 경우 간벌시업이 없이 벌기에 도달해서 벌채만하는 무간벌 대조구에 비해 순수익 및 탄소흡수량이 상대적으로 매우 높다는 것을 알 수 있다. 무간벌 대조구의 경우 순수익의 극대화에 비해 순수익의 약 58% 그리고 탄소흡수량 극대화에 비해 탄소흡수량이 약 60% 정도에 그쳐 경영목표에 따른 집약적 산림경영의 간벌시업효

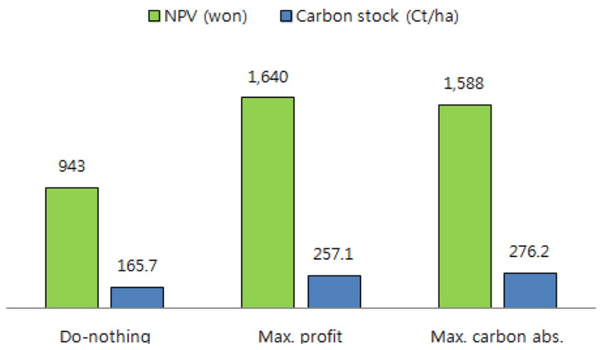
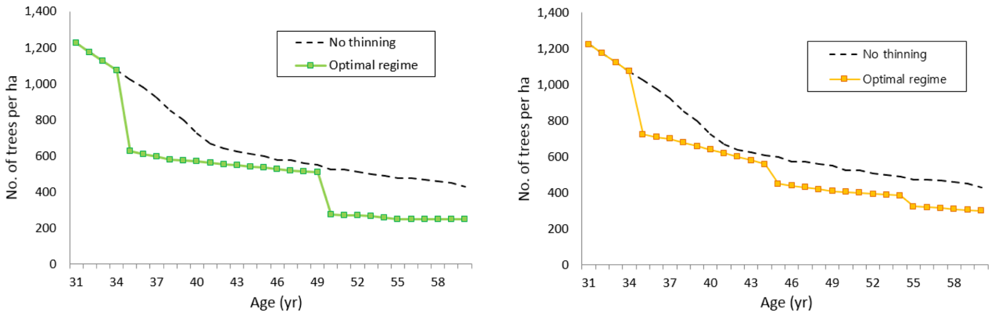


Figure 6. Objective function values by stand management prescriptions.



(a) Max. profit (b) Max. carbon absorption

Figure 7. Changes in the number of trees per ha due to optimal thinning regimes for timber and carbon managements.

Table 7. Stand statistics at the final cut.

Parameters before final cut	Stand management options		
	Do nothing	Max. profit	Max. carbon absorption
Trees/ha	475	250	300
BA (m^2/ha)	86.0	79.0	78.0
Avg. DBH (cm)	50.0	59.2	54.3
Avg. Ht (m)	21.2	22.7	22.3
Final cut vol. (m^3/ha)	723	621	709

Table 8. Accumulated cut volume by stand management options.

Stand management prescriptions	Cut volumes (m^3/ha)		
	Do nothing	Max. profit	Max. carbon absorption
Thinnings	-	572	496
Final cut	723	621	709
Accumulated cut volume	723	1,193	1,205

과가 매우 큰 것으로 나타났다.

이처럼 Figure 6에서 집약적 산림경영에 의해 현격하게 나타나는 간벌시업효과는 임분 내 밀도조절에 의한 잔존목의 생장 촉진과 2회 이상의 수입간벌(commercial thinning)에 따른 중간 수익들에 기인하는 것으로 판단된다.

이러한 간벌시업효과는 임목의 고사율이나 생장촉진 효과에 의해서 설명될 수 있다. 즉, Figure 7은 임분경영 목표 별 최적 간벌시업에 따른 임목본수의 변화를 보여준다. Figure 7(a)와 (b)에 의하면 무간벌 대조구의 경우 함수의 기울기로 표현되는 고사율이 상대적으로 높은 것으로 나타난다. 따라서 순수익 혹은 탄소흡수량 산출에 계상되지 못하는 고사목의 발생이 높은 무간벌 대조구의 경우 목재 혹은 탄소경영을 위한 집약적 산림경영에 비해 목적함수 값에 대한 기여도가 상대적으로 낮을 수밖에 없다.

하지만 Table 8에 나타난 바와 같이 집약적 산림경영의 경우 주벌 및 간벌에 의한 누적생산량은 무간벌 대조구의 경우에 비해 크게 늘어난 것을 알 수 있다. 따라서 집약적 산림경영에 따른 누적된 생장효과가 무간벌 대조구에 비해 수익성이나 탄소흡수량을 추구하는 목적함수 값에 훨씬 크게 기여한다는 사실을 알 수 있다.

결 론

본 연구에서는 제주도 삼나무 임분의 목재 및 탄소경영(timber and carbon management)을 위한 적정 산림시업체계를 결정하고자 하였다. 이를 위해 Kwon(2013)이 개발한 개체목 중심의 생장예측모델을 활용하여 임분 밀도조절에 의한 임분생장을 예측하였고, 이를 토대로 의사결정을 하기 위한 PATH 알고리즘을 적용하였다.

분석결과 순수익이나 탄소흡수량 극대화를 목적으로 집약적 산림경영을 하는 경우 경영목적에 따라 적정한 간벌의 횟수, 시기 및 강도 등의 시업체계에 차이가 있었다. 순수익 극대화의 경우 간벌을 2회 실시하는 것이 가장 유리한 반면 탄소흡수량 극대화의 경우에는 간벌을 3회 실시하되 간벌강도는 상대적으로 낮게 하는 것이 유리한 것으로 나타났다. 그 결과 탄소경영을 주된 목적으로 하는 경우 목재생산에 비해 순수익이 약 3.2% 감소하는 반면 탄소흡수량은 약 6.9% 증가하는 것으로 나타났다.

순수익 혹은 탄소흡수량 극대화를 위한 집약적 산림경영의 경우 무간벌 대조구에 비해 순수익 및 탄소흡수량이 대략 60% 정도 높은 것으로 나타났다. 따라서 한남시험림 삼나무 산림경영에 있어서 집약적 산림경영의 간벌시업효과가 매우 크다는 것을 알 수 있다.

한편 본 연구의 결과는 임분시업체계 결정을 위한 DP 알고리즘의 효용성을 보여주는 사례로 간벌에 의한 밀도조절 등의 효과를 반영할 수 있는 임분생장예측모델이 있음을 전제로 하는 것이다. 따라서 향후에도 다양한 수종 및 입지환경에 따른 임분생장예측모델의 개발이 우선적으로 요구된다.

감사의 글

본 연구는 산림청 ‘임업기술연구개발사업(과제번호 : S211315L020110)’의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

References

Amidon, E.L. and Akin, G.S. 1968. Dynamic programming to determine optimum levels of growing stock. Forest Science 14: 287-291.

Belcher, D.M., Holdaway, M.R., and Brand, G.J. 1982. A description of STEMS-- the stand and tree evaluation and modeling system. General Technical Report NC-79. St. Paul, MN: U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, North Central Forest Experiment Station.

Bellman, R.E. 1957. Dynamic programming. Princeton, N.J: Princeton University Press.

Brodie, J.D. and Kao, C. 1979. Optimizing thinning in Douglas-fir with three-descriptor dynamic programming to account for accelerated diameter growth. Forest Science 25: 665-672.

Chappelle, D.E. and T.C. Nelson. 1964. Estimation of optimal stocking levels and rotation ages of loblolly pine. Forest Science 10: 471-483.

Haight, R.G., Brodie, J.D., and Dahms, W.G. 1985. A dynamic programming algorithm for optimization of lodgepole pine management. Forest Science 31: 321-330.

IPCC. 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse

Gas Inventories. pp. 326.

Korea Forest Research Institute. 2010. Carbon emission factors by korean major tree species for estimation of the greenhouse gas inventory on forests. KFRI Research report in 2010 10-25. pp. 125.

Kurz, W. and Appls, M. 1999. A 70-year retrospective analysis of carbon fluxes in the Canadian forest sector. Ecological Application 9: 526-547.

Kwon, K.B. 2013. Development of a forest stand management model for carbon and timber management. Master's thesis, Seoul National University, Korea. pp. 45.

Kwon, S.D. 2003. Development of a simulation model for stand-level forest management. Ph.D. thesis, Seoul National University, Korea. pp. 113.

Kwon, S.D., Kim, H.H., Chung, J.S., and Lee, K.H. 2003. Development of individual-Tree/distance-independent growth-and-mortality prediction equations for *Pinus koraiensis* stands. Journal of Korean Forest Society 92: 590-597.

Kwon, S.D. and Chung, J.S. 2004. Development of individual-tree distance-independent simulation model for growth prediction of *Pinus koraiensis* stands. Journal of Korean Forest Society 93: 43-49.

Lee, K.Y., Son, Y.M., Rho, D.K., and Kwon, S.D. 2002. Stem weight equations for six major tree species in Korea. Journal of Korean Forest Society 91: 206-212.

Nashlund, B. 1969. Optimal rotation and thinning. Forest Science 15: 446-451.

Paredes, G.L. and Brodie, J.D. 1987. Efficient specification and solution of the even-aged rotation and thinning problem. Forest Science 33: 14-29.

Park, E.S. and Chung, J.S. 2000. Optimal forest management planning for carbon sequestration and timber production using multiobjective linear programming. Journal of Korean Forest Society 89: 335-341.

Pelz, D.P. 1977. Determination of optimal growing stock levels by inventory theory. Forest Science 23: 183-189.

Roise, J.B., Chung, J., LeDoux, C.B. 1988. Optimal stocking of species by diameter class for even-aged mid-to-late rotation Appalachian hardwoods. In: The 1988 Symposium on Systems Analysis in Forest Resources; 1988 March 29-April 1; Asilomar Conference Center; Pacific Grove, California: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station. 166-172.

Schereuder, G.F. 1971. The simultaneous determination of optimal thinning schedule and rotation for an even-aged forest. Forest Science 17: 333-339.

Woo, J.C. and Jang, J.Y. 2009. A study on applying dynamic programming to selection of thinning pathway for *Pinus koraiensis* stand. Journal of Korean Forest Society 98: 225-230.

Yoshimoto, A. and Marusak, R. 2007. Evaluation of carbon sequestration and thinning regimes within the optimization framework for forest stand management. European Journal of Forest Research 126(2): 315-329.

(Received: October 2, 2015; Accepted: December 8, 2015)