탄소가치를 고려한 산림관리 최적화 방안*

이상민** 김경덕*** 송성환****

Keywords
기후변화(climate change), 산림관리체계(forest management scheme), 탄소(carbon), 최적산림관리체계(optimal forest management scheme)

Abstract
This study is designed to find an optimized forest management scheme in preparation for inclusion of the value of carbon abatement in existing forest stands. Schemes to mitigate climate change by protecting forests include reforestation, afforestation and efficient forest management to maximize carbon absorption. The rotation period is extended if the value of carbon absorption as well as the timber values are considered for the stands of pine trees and Korean pine trees. The current management scheme is also analyzed and compared with optimal solutions. The result shows that in the case of pine trees the rotation period is optimal with the current method. But the rotation period decreases and the function value (objective value) increases if the optimal scheme is applied. The reason is that late execution of second thinning brings about slow progress of volume increment and extends the rotation period. If the rotation period is extended the present value from stands is discounted more seriously. To enhance the value of stands, the current rotation should be shortened, and the thinning should be executed at a time.
In the case of Korean pine trees, the current rotation period is too short, and it is not optimal even under the current management method. Under the optimal management scheme, however, the rotation period becomes shorter than the

---

* 이 논문은 2010년에 발간된「기후변화협약에 대응한 산림의 역할과 관리 최적화 방안」보고서를 요약·보완한 것임.
** 한국농촌경제연구원 연구위원
*** 한국농촌경제연구원 연구위원
**** 한국농촌경제연구원 초청전문연구원

current method. This happens because the current method includes four times of silvicultural treatments, and they last until 35 years after plantation. The cost of the treatments could not be recovered until after 100 years of plantation. Hence it is necessary to reduce the frequency of cutting and the age of final cutting.

The simulation results show that the rotation period becomes shorter if the discount rate increases, and it becomes longer if the price of carbon dioxide increases.

It is well known that the rotation period increases if the public values are added to the stands. However, it is also possible to find an optimal management scheme by adjusting the frequency and time of silvicultural treatments. Consequently, it could not be an optimal method of forest management to apply long and flat rotation periods even if some public values are added, but it is necessary to adjust and apply various rotation periods according to treatment numbers and cutting ages of different species.

차례

1. 서론
2. 분석모형
3. 분석결과
4. 정책실험
5. 현행 산림관리 방법과 최적화 방안 비교
6. 요약 및 결론

1. 서 론

산업혁명 이후 화석연료로 인한 기후변화에 대처하기 위해 인류는 1992년 기후변화 협약을 채택하였으며, 2005년 교토의정서가 발효되면서 실질적인 온실가스 감축을 위한 노력이 시작되었다.[1] 산림을 통한 온실가스 흡수는 타 산업에서 적용하는 배출량 감축사업에 비해 제약이 많지 않고 미래의 불확실성에 대한 변동이 적으며, 일정 수준의 흡수량을 지속적으로 확보할 수 있다는 장점이 있다. 또한 산림 흡수원의 활용은 조림과 산림의 효율적 관리를 통하여 지구온난화를 방지할 뿐만 아니라 생태계 보전, 수자

1 교토의정서에는 온실가스 배출 및 흡수원 5개 분야 가운데 토지이용, 토지이용변화, 임업(Land Use, Land-Use Change, and Forestry: LULUCF) 분야를 유일한 온실가스 흡수원으로 인정(ANNEX Ⅰ국가의 경우), 특히 신규조림, 재조림, 산림경영 등을 통한 온실가스 흡수 및 배출에 대해 규정하고 있다.

원 함양, 대기정화, 토사유출 방지, 휴양기능 제공 등의 다양한 공익적 기능을 제공한다(Malmsheimer 외 2008).

국토의 약 65%(644만 ha)가 산림으로 구성되어 있는 우리나라의 경우 산림을 이용한 탄소배출권 취득이 용이할 것으로 전망된다. 효율적인 산림경영을 통하여 약 92만 3천 톤의 탄소를 흡수할 수 있는 것으로 알려져 있으며, 이는 1990년도 배출량의 5%를 감축해야 할 경우 감축량의 약 1/4에 해당한다. 이 양을 국제탄소시장을 통해 구매할 경우 약 414억 원의 비용이 발생하게 된다.

한편 우리나라의 산림정책 패러다임은 치산녹화, 산지자원화에 초점이 맞추어져 있었으나 1998년 이후 지속가능한 산림경영 추진으로 변화하였으며, 2008년부터는 지속가능한 녹색복지국가 실현을 추구하는 단계로 발전하였다. 따라서 지속가능한 산림경영을 위한 산림사업을 도입하여 적용하고, 탄소배출권 확보를 위한 조림확대, 해외조림, 탄소순환마을 조성 등 다양한 계획을 준비하여 실행하고 있다.

숲가꾸기 사업은 지속가능한 산림경영의 기본원칙 아래 산림의 공익적, 사회·경제적 이익을 최적화하도록 산림을 보전하고 관리하는 것으로, 지속가능한 산림관리를 위한 대표적인 산림사업이다. 그러나 현장에서 실시하는 숲가꾸기 사업을 통하여 발생되는 탄소 배출 및 흡수를 모두 고려하였을 경우 실제로 적정한 관리 방안인지에 대한 의문이 제기되고 있는 실정이다. 특히 경제림조성을 위한 관리방법은 온실가스 흡수원 관리방법과 상충되어 지속가능한 산림관리 방안에 온실가스 배출 및 흡수가 충분히 고려되지 않는 것으로 알려져 있다(Malmsheimer 외 2008, 황재홍 2009).

우리나라도 2013년부터 본격적인 이행의무를 시행하여야할 것으로 예상됨에 따라 온실가스 배출을 감축하기 위한 산업별 대응 방안이 다양하게 연구되고 있다(김준순 2004). 그러나 온실가스 흡수원인 산림의 관리방안에 대한 논의는 상대적으로 활발하지 못한 실정이다. 따라서 post-2012 기후변화협약에 대비한 산림의 역할을 재조명하고, 효율적인 관리를 위한 산림의 온실가스 흡수 최적화에 대한 연구가 절실히 필요한 상황이다. 특히, 탄소의 배출과 흡수에 대한 계량화된 결과를 수집하여 관련된 예를 명시적으로 분석·모형화한 연구는 많지 않다.

정남정 외(2008)는 IPCC 배출량 산정법에 따른 전라북도 온실가스 배출량을 산정하고 예측함으로써 특성분석을 통한 지자체 차원의 각 부문별 온실가스 저감방안을 제시하였다. Malmsheimer 외(2008)는 목제품 이용, 산림 바이오매스 대체, 산불관리, 산림전용회피 등을 통한 온실가스 배출 저감 효과와 산림의 탄소저장을 통한 온실가스 흡수 효과를 소개하면서, 탄소저장 증대를 위해 건강성 유지, 고사·산불·병해충 등으로 인한 손실방지가 필요하다고 주장하였다. 김점수(2009)는 기후변화협약 및 교토의정서

에 따른 탄소흡수원으로서 산림에 대한 기준을 검토하면서 강원도 탄소흡수량을 실제로 산정하였는데, 산림의 타용도 전환에 따른 CO_2 배출 측정, 토지이용(산림, 논, 밭, 기타) 변화활동에 따른 탄소 저장량 변화 추정과 농업용 석회 사용에 따른 이산화탄소 배출량을 추정하였다. 황재홍(2009)은 산림 내에서 이루어지는 탄소저장과 저장증대를 위한 산림경영 방안을 사례중심으로 소개하였다.[2]

이들 선행연구는 산림의 온실가스 흡수원으로서의 가능성제시와 사례분석에 그쳐 온실가스 배출 및 흡수를 감안한 지속가능한 산림관리의 적정성 판단과 온실가스 흡수원으로서의 최적화된 산림 부문 관리방안을 검토하는 데 한계가 있다. 본 연구는 기존의 연구와 달리 산림경영 활동에서 발생하는 탄소의 배출과 흡수에 대한 계량화된 결과를 명시적으로 모형화하고 산림관리의 최적화 방안을 모색한다. 이를 위하여 대표적 산림관리 사업인 숲가꾸기 사업을 통한 적정 산림방안 도출을 위하여 동태모형 분석을 실시하였으며, 이자율 변화, 이산화탄소거래가격 상승, 원목가격 인상 등에 따라 변화하는 적정 관리방법을 찾기 위해 정책실험과 최적화 방안을 제시하였다.

본 연구는 총 6개 절로 구성되어 있다. 서론에 이어 제 2절에서 분석의 기본모형이 제시된다. 제 3절에서는 시나리오별 최적화분석이 제시되고, 제 4절에서 정책실험, 제 5절은 분석모형의 결과와 현행 산림관리방안이 수종별로 비교 분석된다. 끝으로 요약 및 결론이 제시된다.

2. 분석모형

2.1 분석 대상 및 자료

본 연구는 기후변화에 영향을 미치는 온실가스 가운데 산림이 흡수원으로서의 역할

---

2 조림지 정리작업의 경우 토양탄소를 0~40%까지 감소시키는 것으로 나타났으며, 간벌은 일반적으로 탄소 축적량을 감소시키는데, 미송(Douglas-fir, Pseudotsuga menziesii)과 테다소나무(Loblilly pine, Pinus taeda)에 대한 시뮬레이션 결과 40% 간벌강도의 경우 12~18%의 탄소 축적이 감소한다고 밝혔다. 벌채의 경우 약 10% 미만의 탄소축적 변화가 예상되며, 연간 생장량이 최대인 수령으로 윤벌기를 변경하면 임목의 탄소저장량은 감소하므로 목재수확에 따른 수입과 상충할 수 있다고 주장하였다(35년 윤벌기, 식재밀도 1,500본/ha, 20년생 임분을 대상으로 조사한 결과임).

을 수행할 수 있는 탄소를 대상으로 하였다. 또한 다양한 산림사업 가운데 지속가능한 산림경영을 위한 숲가꾸기사업을 검토하며, 탄소 배출 및 흡수와 관련된 세부 사업인 간벌과 어린나무 가꾸기로 선정하여 분석하였다. 대상 수종은 소나무와 잣나무로 제한하였으며 초기값은 임분연령 10년, 수고(樹高) 4.4m, 가슴높이 직경(흉고직경) 4cm, 본수 6,000본으로 설정되어 있다. 소나무의 경우 지위지수는 12.17이며, 잣나무 11.91이다. 용재 부피별로 가격을 차별화하기 위하여 산림조합에서 제공하는 국산원목 가격을 참조하였다. 소나무의 경우 원목으로 사용할 수 있는 30년생 이후의 원목에 대해서는 12cm~18cm×1.8m 규격의 가격인 58,000원/m^3을 적용하였으며, 30년생까지는 규격에 제한 없이 거래되는 가격인 48,000원/m^3을 적용하였다.[3] 잣나무의 경우 30년생 이후의 원목에 대해서는 15cm~30cm×2.7m 규격의 가격인 115,500원/m^3을 적용하였으며, 30년생 이하의 원목 가격은 소나무와 마찬가지로 48,000원/m^3을 적용하였다.[4]

30년생 이하의 원목에 대해서는 헥타르당 생산되는 재적에 모두 낮은 가격(48,000원/m^3)을 적용하였으며, 30년생 이후부터는 높은 가격(소나무의 경우 58,000원/m^3)과 낮은 가격의 가중평균을 계산하여 적용하였다. 가중평균은 정성호 외(2003)에서 제시된 간벌강도별 품등조사결과를 적용하였는데, 간벌율 74% 강도의 경우 2등급이 67.9%를 차지하고, 46% 간벌율의 경우 29.8%, 무간벌의 경우 3.9%를 차지하는 것으로 나타났다.[5] 따라서 무간벌일 경우 생산량의 3.9%만 높은 가격을 적용하고, 나머지 96.1%에 대해서는 낮은 가격을 적용하여 가중한다. 간벌강도가 10%, 20%, 30%, 40% 등 수확량 비율이 나타나있지 않은 경우에는 선형보간법을 이용하여 계산한 값을 적용하였다.

산림작업에서 발생하는 비용은 대상지의 위치에 따라 다양하게 나타나므로 표준화가 매우 어렵다. 이 연구에서는 이우균(1995)이 제시한 작업별 비용을 적용하였는데, 단위노동력의 비용은 41,218원으로 재설정하였다.

---

3 15cm~30cm×1.8m은 여주 2등급 생산지 가격이며, 제한없이 거래되는 소나무는 양평 2등급 생산지 가격임.

4 잣나무의 경우 30년생 이하의 소경목에 해당하는 참고 가격을 시장정보에서 찾을 수 없으므로 펠릿제조를 위하여 투입되는 원목가격을 대체하여 적용함. 산림조합 내부자료에 따르면 펠릿제조를 위한 원목 구입가격이 70,000원/톤이므로 침엽수 원목의 톤을 부피(m^3)로 환산하는 계수 1.43을 대입하여 원목가격을 산정하면 단위부피(m^3)당 48,951원이 된다. 따라서 소나무와 같은 48,000원/m^3을 적용하였음.

5 정성호 외(2003). 이 연구의 대상지역은 임업연구원 광릉시험림 9임반 파소반으로 총면적 3.95ha, 임목지 3.9ha인 인공 잣나무림. 1966년에 ha당 5,000본을 조림하였고 1983년과 1987년에 각각 1, 2차 간벌을 실시. 벌채 강도별로 구분된 임지의 표준목 10본씩을 채취하여 조사한 결과임. 벌채시기가 만기되지 않았으나 품등의 비율은 벌채 때와 같다고 가정.

탄소의 가격은 2009년 11월 EU시장(ECX)에서 거래된 이산화탄소의 가격과 대미환율을 적용하여 탄소 가격으로 환산하였으며, 톤당 탄소의 가격은 89,320원[6]으로 적용하였다.

간벌 및 주벌에 의한 임목의 탄소배출량, 그리고 부피생장을 통한 탄소흡수량 등 탄소 배출 및 흡수와 관련된 자료는 실제 측정치가 없으므로 동적임분생장모델(dynamic stand growth model)[7]을 이용하여 도출한 사업별 ha당 재적을 이용하였다. 탄소의 흡수와 목재의 경제성을 고려한 산림관리 방안을 찾기 위하여 동태모형을 분석하여 벌채시기(벌기령)를 선정하였으며, 이자율 변화, 이산화탄소거래가격 상승, 원목가격 인상 등에 따라 변화하는 적정 관리방법을 찾기 위해 정책실험을 실시하고 최적화 방안을 제시하였다.

2.2. 이론적 배경

산림은 성장과정에서 광합성을 통하여 탄소를 흡수하며, 성숙한 임목이 벌채되어 이용될 경우 경제적인 가치를 가지게 된다. 벌채된 후 목제품으로 가공될 경우 탄소저장 가능성에 대한 여러 가지 의견이 있으나 국제적인 합의가 이루어지지 않은 상태이다. 따라서 임목은 벌채되면 저장 탄소를 배출한다는 IPCC의 기본가정을 적용한다.

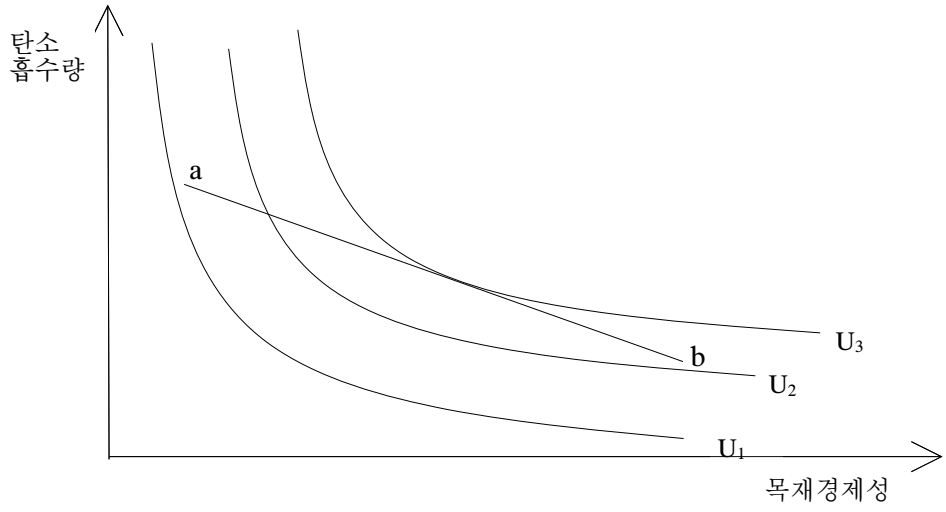
산림관리의 목적을 탄소흡수와 가치 있는 목재생산을 통한 사회의 효용을 극대화 시키는 것이라 가정했을 경우, 효용함수는 <그림 1>과 같이 나타난다. 경제림 조성사업을 통하여 탄소흡수와 목재의 경제성을 확보할 수 있다. 간벌과 같은 산림관리 사업의 강도를 높일 경우 목재의 경제성은 일정 수준까지 올라가지만 탄소흡수량은 감소한다고 가정한다. 따라서 단위면적당 산림관리에 따른 효용함수는 왼쪽 위에서 오른쪽 아래로 오목한 형상을 띄는 곡선으로 표현되며, 한계효용 감소의 법칙이 적용된다. 또한 탄소배출을 줄이면서 목재의 경제성을 높이는 기술이 개발되면 효용함수는 위쪽으로 이동하게 된다. 선분ab는 상대가격(탄소가격에 대한 목재가격)을 나타내는 제약선이 되며, 효용곡선과 가격제약선이 접하는 점에서 탄소흡수와 목재생산을 동시에 고려한 최적의 생산활동이 된다.

---

6 연간 탄소흡수량×44/12=연간 이산화탄소 흡수량으로 환산되며, 89,320원(톤당 탄소가격)=21$(이산화탄소가격)×1,160(환율)×44/12로 계산함.

7 본 모델은 고려대학교 환경생태공학부 이우균교수가 만든 것으로 소나무와 잣나무 분석을 위한 기초 자료를 도출하는 데 사용함(이상민 외(2010) 참조).

그림 1. 경제림 관리에 따른 효용함수



이상의 이론은 경제림관리의 일정시점에서 측정이 가능한 정태적분석을 설명한 것이다. 그러나 나무는 일생동안 부피생장을 통하여 탄소를 흡수하고, 최종적으로 벌채되어 목재를 제공하므로 위에서 설명한 여러 가지 현상들은 일정한 시차를 두고 지속적으로 발생하게 된다. 정태적 분석은 목적함수에 영향을 미치는 일들이 동시에 일어난다고 가정하기 때문에 분석을 위하여 적용하기는 곤란하다.

산림자원관리는 지속적인 산지이용과 동일한 것으로 간주할 수 있으며, 목적함수가 시간의 지배를 받으므로 동태분석이 필요하다. 따라서 목재 적정관리 모형은 일정한 임분 내의 재적변화를 동태방정식(equation of motion)으로 설정하고, 수확(간벌 및 주벌)에 따른 경제적 가치와 수확하지 않음으로써 얻을 수 있는 환경적 가치(탄소의 경제적 가치)를 변수로 하는 사회적 효용함수를 목적함수로 가정하여 동태분석에 따라 최적의 관리방안을 구할 수 있다. 즉 목재의 경제적 가치와 환경적 가치를 위한 적정관리 모형은 다음과 같이 설정할 수 있다. 목적함수는 벌채후 수확한 목재의 경제적 가치와 벌채전 임목의 탄소흡수로 인해 얻을 수 있는 경제적 가치를 모두 고려한 사회적 효용으로 설정한다. 임분의 재적을 나타내는 변수는 상태변수(s, state variable)이며, 벌채량을 나타내는 변수는 제어변수(x, control variable)이다. 각 변수에 대한 목적함수의 1계 편도함수는 음의 값을 가지고, 2계편도함수는 양의 값을 가진다. 임분의 임목재적은 벌채전 탄소저장에 따른 가치를 측정할 수 있는 변수(state variable)로서, 전기(前期)의 재적량과 제어변수(control variable)인 간벌량 또는 벌채량에 따라 변화한다. 따라서 t기의 시업에 따른 재적변화율($\dot{s}(t)$)은 같은 기간 성장한 부피($\gamma s(t)$)에서 벌채, 간벌 등을

통해 수확한 부피($x(t)$)를 제외한 값과 같다. 최적 벌채량을 구하기 위한 문제는 다음과 같이 표현된다.

$$Max_{x(t)} \int_1^T e^{-rt} u(x(t), w(s(t))dt$$

$$s.t. \qquad \dot{s}(t) = \gamma s(t) - x(t)$$

$$x(t) \geq 0$$

$$s(t) \geq s_{\min}$$

여기서 w는 임목의 재적을 탄소량으로 환산하는 함수로서 임목 건중량(=줄기재적×줄기밀도×지상부확장계수)의 50%로 계산할 수 있다. 이 값은 수종에 따라 다른 값을 가지지만, 시간(t)에 따라 변화하지 않는 것으로 가정한다. γ는 임목의 성장을 나타내는 계수이다. 간벌량 또는 벌채량은 영이상의 값을 가지며, 최종연도 재적량은 최소값보다 크거나 같아야한다.

최적화 문제의 내부해가 존재할 경우 다음의 식을 만족(필요조건)한다.

$$\cdot \; u'(w(t))\frac{dw(s(t))}{ds} = (r-\gamma)u'(x(t)) - u''(x(t))\frac{dx}{dt}$$

즉, 임목의 한계효용에 재적변화에 따른 탄소흡수량의 변화를 곱한 값은 벌채에 따른 한계효용에 이자율과 성장률의 차이를 곱한 값에서 벌채에 따른 한계효용의 변화에 벌채율을 곱한 값을 뺀 값과 같다.

2계 충분조건은 벌채량과 재적량에 대해 2계편도함수로 형성된 다음의 야코비언행렬이 음반정부호(negative semidefinite)를 가질 경우 만족한다.

$$\cdot \; \begin{bmatrix} e^{-rt}u''(x) & 0 \\ 0 & e^{-rt}u''(w(s(t))(\frac{dw}{ds})^2 \end{bmatrix}$$

$u''(s) < 0, \quad u''(w(W(t))) > 0$이므로 2계 충분조건을 충족하고 해를 가진다.

시간의 범위를 과거 특정 시점부터 무한대까지로 가정할 수 있으며, 다이나믹프로그래밍(dynamic programing)을 이용하여 해를 구할 수 있다. 위의 문제를 Bellman 방정식(Bellman's equation)으로 나타내면 다음과 같다.

$$- \; V_t(s) = \max_{x \in X(s)} \left\{ u(x(t), w(s(t)) + \delta \sum_{s' \in S} P(s'|s,x) V_{t+1}(s') \right\}$$

$s \in S, \quad s' = \dot{s}$

$t = 1, 2, \ldots, T$

여기서 P(s'|s,x)는 다음 회기의 상태변수의 확률분포를 나타낸 것으로, 현재의 상태(s),

제어정도(x)에 의해 결정된다. 또한 S는 상태변수 공간을, X는 제어변수 공간을 나타내고, δ는 할인요소(discount factor)를 나타낸다.

2.3. 최적화 분석

다이나믹프로그래밍의 경우 수학적인 분석(mathematical analysis)을 통하여 해를 구하는 것이 불가능한 경우가 많다. 따라서 보간법(interpolation)을 이용하여 근사값 또는 근사함수를 추정하게 된다. 그러나 다이나믹프로그래밍을 이용하는 경우에도 충격제어(impulse control) 방식[8]에 따라 벌채의 비율 또는 시기를 정하는 정도의 분석이 가능하지만 간벌이나 어린나무가꾸기 등을 고려한 복잡한 구조의 문제는 다루기 매우 힘들다. 그러나 이 연구의 목적함수는 목재의 경제적 가치와 탄소의 경제적 가치를 평가하여 수익을 비교하는 것이므로 선형방정식 모형을 가지게 되며, 상태변수가 확률분포를 가지지 않는다고 가정할 경우(nonstochastic) 위의 Bellman 방정식을 전개하여 스프레드쉬트에서 문제를 풀 수 있다. 단, 나무의 연령별 생산재적에 대한 정보를 미리 알고 있을 경우에 한한다.

시간범위를 무한대로 가정할 경우, Bellman 방정식은 아래와 같이 표현할 수 있다.

- $V(s) = \max_{x \in X(s)} \{\Pi(x, w(s)) + \delta V(s')\},\ s \in S$

여기서 $\Pi(x, w(s))$는 벌채를 했을 경우 목재판매를 통해 얻는 수익과 벌채 전까지의 탄소저장을 통해 얻는 수익을 나타내는 함수로 아래와 같이 표현된다.

- $\Pi(s,x) = p_t \times x - c + p_{CO_2} \times w(s)$

시간의 범위를 무한대로 가정하면, 최적화의 필요조건은 V(s*)=δV(s')이 된다. 즉 상태변수 s*에서 벌채를 통해 얻을 수 있는 가치함수의 값이 할인요인을 적용한 다음 회기에서의 가치와 같을 때 최적화가 달성된다. 이는 연간 생장재적이 모두 알려진 경우에 한하여(s와 s'을 모두 알고 있는 경우) 만족하는 조건이며, Bellman 방정식에서 표현하는 바와 같이 가치함수가 최대값을 가지는 간벌강도와 벌채시기(벌기령)를 찾으면 되는 것이다. 실제 계산에서는 목재가치와 탄소흡수 가치를 따로 계산한 후 더하게 된다.

---

8 이 방법은 엄밀히 말하면 다이나믹프로그래밍과 비슷하지만 구별되는 것으로, 연속된 시간모델의 한 종류임. 상태변수(state variable)가 순간적으로 급격하게 변하는 것을 반영하기 위해 고안된 것임. 상태변수의 drift와 diffusion을 이용하는 Ito Process를 따르게 됨(Miranda & Fackler. 2002. pp347-358).

3. 분석결과

3.1. 목재의 경제성만 고려한 최적화분석

목재의 경제성만을 고려한 최적화분석에서는 용재의 부피별 가격과 산림작업에서 발생되는 비용을 적용하여 최대 가치함수값을 갖는 간벌연령 및 간벌 강도를 계측하였다.

최적화 방법은 각 연령별로 벌채를 실시하였을 경우의 총가치함수(V(s))값을 구하고, 이 값들을 서로 비교하였을 때 최고의 가치함수 값을 가지는 연령이 최적벌채시기가 된다. 즉, 각 연령을 벌기령(rotation period)으로 가정하여 반복적으로 벌채할 때의 가치함수(V(s'))값을 구하며, 이 값에 할인요소를 적용하여 합하면 연령별 총가치함수 값이 된다. 각 연령(벌기령)별 미래 가치함수(V(s'))값을 영이 될 때까지 전개하면 사업시기를 무한대로 하는 모형의 분석을 실시할 수 있다.

임분연령 t년에서 간벌 또는 어린나무가꾸기를 시행할 경우의 예를 들면 다음과 같다. 1년부터 t년까지의 가치함수값은 임분연령에 해당하는 재적을 모두 벌채할 때의 이윤과 비용만 고려하였다. 반면 t+1년부터의 가치함수값은 벌채 이윤과 비용에 간벌의 이윤과 비용을 함께 고려하였다.

3.1.1. 간벌만 실시할 경우

간벌시기를 임분연령 15년~30년으로 구분하고, 각 간벌시기별로 강도 0%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 45%, 50%, 55%, 60%, 65%, 70% 등으로 나누어 목재의 경제성 최적화를 위한 간벌시기와 간벌강도를 측정한 결과 소나무의 경우 간벌연령은 22년, 간벌강도는 65%인 것으로 분석되었으며, 잣나무의 경우 최적벌기령은 48년이며, 간벌연령은 22년, 간벌강도는 70%인 것으로 나타났다.

표 1. 간벌만 실시할 경우의 최적벌기령 및 간벌강도

단위: 백만 원

수종	간벌연령	간벌강도(%)	벌기령	가치함수값
소나무	22	65	39	17.01
잣나무	22	70	48	24.48

간벌연령별 최적화 조건을 보면 소나무의 경우 간벌연령이 높아질수록 간벌강도는 줄어들고 벌기령은 길어지는 것을 알 수 있다. 그러나 잣나무의 경우에는 반대로 간벌연령이 높으면 벌기령은 짧아지는 것으로 나타났다. 이러한 원인은 소나무의 경우 간벌 후 부피생장을 위한 충분한 시간이 필요하나 잣나무는 간벌 후 생장이 빨라 이익을 창출하기 위한 시간이 오래 걸리지 않기 때문인 것으로 생각된다.

3.1.2. 어린나무가꾸기와 간벌을 동시에 실시할 경우

나무의 생장촉진을 위해서 어린나무가꾸기와 간벌을 순차적으로 적용하는 것이 일반적이다. 어린나무의 성장을 방해하는 요인을 제거하기 위한 작업으로 어린나무가꾸기를 실시하며, 입목(立木)의 수고 및 부피 생장을 돕기 위해 간벌을 실시한다. 현재 시행되고 있는 산림작업과 비교하기 위하여 위에서 분석한 어린나무가꾸기와 간벌을 복합하여 산림작업을 수행할 경우의 목재생산 최적화 관리방법을 찾아보았다.

어린나무가꾸기의 작업강도를 20%와 30%로 나누고, 작업시기는 11년~14년으로 구분하였다. 간벌연령은 21년~28년으로 구분하였으며, 강도는 0%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 45%, 50%, 55%, 60%, 65%, 70% 등으로 나눈다.

어린나무가꾸기와 간벌이 동시에 실시될 경우 가치함수값을 비교하면 어린나무가꾸기 작업강도 20%에서는 작업연령에 관계없이 간벌연령 24년, 강도 65%, 벌기령 43년에서 적정관리가 되며, 30%에서는 간벌연령 25년, 강도 60%, 벌기령 42년이 적정관리가 되는 것으로 나타났다. 어린나무가꾸기의 최적화 조건을 보면 30%보다 20%에서 가치함수값이 높게 나타나며, 작업연령이 높아질수록 가치함수값이 올라간다.

최적화 상태를 간벌만 시행했을 경우(표 1)와 비교해 보면, 간벌연령과 벌기령이 모두 길어진 것을 알 수 있다. 그러나 가치함수값은 작업연령 14년, 강도 20%에서 15.95백만 원, 30%에서 15.80백만 원으로 간벌만 했을 경우 발생하는 가치함수값 17.01백만 원보다 낮은 것을 알 수 있다. 그 이유는 동일한 임분연령에서 간벌만 실시했을 때보다 재적이 적으므로 벌채시기가 느려지며, 벌채수익에 대한 할인요인이 커지기 때문이다.

표 2. 소나무 어린나무가꾸기와 간벌을 실시한 임분의 최적화 관리방안 (목재의 경제성만 고려)

단위: 년, %, 백만 원

어린나무 가꾸기 실시연령	어린나무가꾸기 20%				어린나무가꾸기 30%			
	간벌 연령	간벌 강도	벌기령	가치 함수값	간벌 연령	간벌 강도	벌기령	가치 함수값
11년	24	65	43	15.75	25	60	42	15.51
12년	24	65	43	15.81	25	60	42	15.60
13년	24	65	43	15.88	25	60	42	15.69
14년	***24***	***65***	***43***	***15.95***	***25***	***60***	***42***	***15.80***

표 3. 잣나무 어린나무가꾸기와 간벌을 실시한 임분의 최적화 관리방안 (목재의 경제성만 고려)

단위: 년, %, 백만 원

어린나무 가꾸기 실시연령	어린나무가꾸기 20%				어린나무가꾸기 30%			
	간벌 연령	간벌 강도	벌기령	가치 함수값	간벌 연령	간벌 강도	벌기령	가치 함수값
11년	24	70	47	22.51	26	70	47	21.96
12년	24	70	47	22.55	26	70	47	22.01
13년	24	70	47	22.59	26	70	47	22.06
14년	***24***	***70***	***47***	***22.63***	***26***	***70***	***46***	***22.43***

잣나무의 경우 어린나무가꾸기 작업강도 20%에서는 간벌연령 24년, 강도 70%, 벌기령 47년에서 적정관리가 되는 것으로 나타났다. 작업강도 30%에서는 간벌연령 26년, 강도 70%, 벌기령 46년에서 적정관리가 된다. 어린나무가꾸기의 최적화 조건은 30%보다 20%에서 가치함수값이 높게 나타나며, 작업연령이 높아질수록 가치함수값이 올라가는 것은 소나무와 동일하다.

최적화 상태를 간벌만 시행했을 경우(표 1)와 비교해 보면, 간벌연령은 길어지고 벌기령은 오히려 짧아진 것으로 나타났다. 가치함수값은 작업연령 14년, 강도 20%에서 22.63백만원, 30%에서 22.43백만 원으로 간벌만 했을 경우 발생하는 가치함수값 24.48백만원 보다 낮게 분석되었다. 이는 소나무와 마찬가지로 동일한 임분연령에서 간벌만 실시했을 때보다 재적이 적기 때문이다.

3.2. 목재와 탄소의 경제성을 고려한 최적화분석

목재의 경제성 최적화 방법과 마찬가지로 간벌시기를 임분연령 15년~30년으로 구분하고, 각 간벌시기별로 간벌강도 0%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 45%, 50%, 55%, 60%, 65%, 70% 등으로 나누어 탄소흡수 최적화를 위한 간벌시기와 간벌강도를 계측하였다. 최종적으로 목재생산 가치함수값과 합하여 임분의 적정관리 수준을 결정한다. 벌채 및 간벌에 따른 비용은 목재생산만 고려한 분석에 모두 포함되어 있으므로 따로 고려하지 않았다.

목재가 벌채되는 순간 탄소는 모두 대기 중으로 날아가는 것으로 가정하였으므로 탄소흡수에 따른 가치는 연간 흡수량의 현재가치 합에서 벌채시기의 배출량(연간흡수량의 합)의 현재가치를 빼준 값으로 나타낼 수 있다. 임분연령 k에서 벌채를 실시했다고 가정하면, 탄소흡수 및 배출에 따른 현금의 흐름은 다음과 같이 나타난다.

$$\sum_{t=1}^{k} \frac{1}{(1+r)^t} P_{CO_2} \triangle C_t - \frac{1}{(1+r)^k} \sum_{t=1}^{k} \triangle C_t$$

$$= P_{CO_2} [\sum_{t=1}^{k} \frac{1}{(1+r)^k} \triangle C_t - \frac{1}{(1+r)^k} \sum_{t=1}^{k} \triangle C_t]$$

여기서 $\triangle C_t$는 연간 재적변화에 따른 탄소 흡수량의 변화를 나타낸다. 위 식의 첫째항은 연간 탄소흡수량 증가에 따른 이윤을 타나내며, 둘째항은 벌채나 간벌로 인한 탄소배출 비용을 나타낸다. 탄소의 경제성을 고려한 가치함수값을 목재의 경제성 최적화 결과와 합하면 목재생산과 탄소흡수를 동시에 고려한 간벌 최적화를 구할 수 있다.

3.2.1. 간벌만 실시할 경우

탄소와 목재의 경제성 고려한 최적화 분석 결과 소나무의 최적 벌기령은 46년 또는 48년이며, 간벌강도는 65%이다. 이때의 간벌연령은 25년 또는 26년인 것으로 분석되었다(표 4). 즉 임분의 연령이 25년이나 26년일 때 강도 65%로 간벌을 실시하며, 임분의 연령이 46년 또는 48년에 이르렀을 때 벌채하는 것이 최적화된 간벌 및 벌채방법이라 할 수 있다. 목재와 탄소의 경제성을 동시에 고려하면 목재의 경제성만을 고려했을 때보다 간벌연령은 13.6~18.2% 증가하고 벌기령은 18~23.1% 늘어난 것으로 분석되었다.

잣나무의 목재와 탄소의 경제성을 고려한 최적화 관리를 산정한 결과 간벌연령 22

년, 간벌강도 70%, 벌기령은 52년에서 최고의 가치함수값을 나타내는 것으로 분석되었다. 목재의 경제성만을 고려했을 경우와 비교해보면, 간벌연령이나 강도는 변화가 없으나 벌기령이 8.3% 늘어난 것으로 나타났다.

표 4. 수종별 목재와 탄소의 경제성을 고려한 간벌작업

단위: 연, %, 백만 원

	목재의 경제성 고려				목재 및 탄소의 경제성 고려			
수종	간벌 연령	간벌 강도	벌기령	가치 함수값	간벌 연령	간벌 강도	벌기령	가치 함수값
소나무	22	65	39	17.009	25	65	46	20.092
					26	65	48	20.092
잣나무	22	70	48	24.477	22	70	52	28.405

3.2.2. 어린나무가꾸기와 간벌을 동시에 실시할 경우

앞선 목재의 경제성 최적화분석 방법과 마찬가지로 어린나무가꾸기의 작업강도를 20%와 30%로 나누고, 작업시기는 11년~14년으로 구분하였다. 간벌연령은 21년~28년으로 구분하였으며, 강도는 0%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 45%, 50%, 55%, 60%, 65%, 70% 등으로 나누어 분석하였다.

어린나무가꾸기와 간벌을 순차적으로 적용한 소나무 임분의 경우 간벌연령 26년 강도 65%, 벌기령 48년이 적정 관리방법이며, 이때 어린나무가꾸기의 작업연령은 14년, 작업강도는 20%인 것으로 분석되었다(표 5). 어린나무가꾸기의 최적화 조건은 높은 작업연령과 낮은 작업강도임을 알 수 있다.

잣나무의 경우 어린나무가꾸기 작업강도가 20%일 경우 간벌연령 24년, 벌기령 58년, 30%에서는 간벌연령 26년, 벌기령 56년 또는 57년에서 적정 가치함수값을 가진다(표 6). 그러나 어린나무가꾸기 작업강도 20%, 작업연령 14년에서 최대 가치함수값을 나타내어 소나무와 같이 높은 작업연령과 낮은 작업강도에서 최적화 조건을 만족하는 것으로 나타났다.

표 5. 소나무 어린나무가꾸기와 간벌을 실시한 임분의 최적화 관리방안(목재와 탄소의 경제성을 고려)

단위: 년, %, 백만 원

어린나무 가꾸기 실시연령	어린나무가꾸기 20%				어린나무가꾸기 30%			
	간벌 연령	간벌 강도	벌기령	가치 함수값	간벌 연령	간벌 강도	벌기령	가치 함수값
11년	26	65	48	18.969	26	65	48	18.889
12년	26	65	48	19.026	26	65	48	18.969
13년	26	65	48	19.089	26	65	48	19.058
14년	***26***	***65***	***48***	***19.157***	***26***	***65***	***48***	***19.155***

표 6. 잣나무 어린나무가꾸기와 간벌을 실시한 임분의 최적화 관리방안(목재와 탄소의 경제성을 고려)

단위: 년, %, 백만 원

어린나무 가꾸기 실시연령	어린나무가꾸기 20%				어린나무가꾸기 30%			
	간벌 연령	간벌 강도	벌기령	가치 함수값	간벌 연령	간벌 강도	벌기령	가치 함수값
11년	24	70	58	26.488	26	70	57	25.770
12년	24	70	58	26.525	26	70	57	25.817
13년	24	70	58	26.563	26	70	57	25.866
14년	***24***	***70***	***58***	***26.603***	***26***	***70***	***56***	***26.193***

3.3. 최적화 분석결과 비교

최적화 분석의 결과를 비교하여 보면 다음과 같다. 소나무와 잣나무의 최고 가치함수값를 유도하는 작업은 목재와 탄소의 경제성을 동시에 고려하고, 어린나무가꾸기를 실시하지 않은 채 간벌만 하는 것이 더 높은 가치함수값을 갖는 것으로 나타났다. 이때의 간벌연령은 소나무의 경우 목재의 경제성만 고려했을 때보다 13.6~18.2% 늘어난 25년 또는 26년이며, 벌기령은 17.9~23.1% 늘어난 46년 또는 48년이다. 간벌강도는 65%에서 최적을 이룬다. 잣나무의 경우에는 간벌연령은 같으나 벌기령이 8.3% 늘어난 52년이 된다.

어리나무가꾸기와 간벌을 순차적으로 실시하는 복합관리방법의 경우 어린나무가꾸기는 임분연령 14년에 20% 강도로 실시하는 것이 소나무와 잣나무 모두에게 유리하다. 소나무 간벌은 24년에 65% 강도로 하는 것이 적정 관리이며, 잣나무 간벌은 26년에 70%로 실시하는 것이 적정 관리방법이다. 이때 벌기령은 11.6%, 23.4% 각각 늘어난다. 또한 간벌만 실시한 경우의 가치함수값이 더 높은 것으로 나타나 어린나무가꾸기가 목재 및 탄소의 경제적 가치를 높이는 데 크게 도움이 되지 않는 것으로 생각된다.

표 7. 소나무산림 관리 작업별 최적화 결과

단위: 년, %, 백만 원

작업	고려인자	시행연령	시행강도	벌기령	가치함수값
간벌	목재 경제성	22	65	39	17.009
	목재 및 탄소 경제성	25, 26	65	46, 48	20.092
어린나무 가꾸기 +간벌	목재 경제성	14(어린)	20	43	15.948
		24(간벌)	65		
	목재 및 탄소 경제성	14(어린)	20	48	19.157
		26(간벌)	65		

표 8. 잣나무산림 관리 작업별 최적화 결과

단위: 년, %, 백만 원

작업	고려인자	시행연령	시행강도	벌기령	가치함수값
간벌	목재 경제성	22	70	48	24.477
	목재 및 탄소 경제성	22	70	52	28.405
어린나무 가꾸기 +간벌	목재 경제성	14(어린)	20	47	22.633
		24(간벌)	70		
	목재 및 탄소 경제성	14(어린)	20	58	26.603
		26(간벌)	70		

4. 정책실험

정책실험(Simulation)은 모형의 외부적인 환경의 변화, 특히 정책의 변화에 따른 결과를 예측하기 위하여 실시한다. 이 연구에서는 최적화 조건이 주어진 외생변수 변화에 따라 어떻게 달라지는가를 분석하여 외부환경 변화에 대응할 수 있는 산림관리방안을 제시하고자 하였다. 앞서 분석한 어린나무가꾸기와 간벌을 순차적으로 적용하는 사업을 Baseline으로 설정하였는데, 주요 외생변수는 아래와 같다.

표 9. Baseline의 주요 외생변수 값

외생변수명	외생변수값	
할인요소의 이자율(r)	2%	
간벌생산재 가격(낮은가격)	48,000원/㎥	
원목가격(높은가격)	소나무	58,000원/㎥
	잣나무	115,500원/㎥
이산화탄소 거래가격(2009년 EU시장)	21$/tCO$_2$	
대미환율 (2009.11.10)	1,160원/달러	

이자율(rate of return)이 올라가면 소나무의 간벌연령과 벌기령은 낮아진다. 그러나 잣나무의 간벌연령은 올라가는 것으로 분석되었다. 경기 침체 이후 회복에 따른 출구전략 시행으로 이자율은 올라갈 것으로 전망된다. 그러나 40년 이상을 내다보는 장기적 투자인 산림사업의 경우 경제의 안정화가 이룩된다는 가정 하에 현행의 2%가 적절할 것으로 예상된다.

러시아의 수출세 인상, 원목 수출국의 환경보호를 위한 원목 수출 제한 등 다양한 통상여건을 고려했을 때 원목의 수입이 어려워질 것으로 예상된다. 이와 더불어 소득의 증가와 함께 원목에 대한 수요가 늘어날 것이므로 국내산 원목의 가격은 높아질 것으로 전망된다. 따라서 간벌연령은 더욱 줄여야 할 것으로 생각된다. 잣나무의 경우 벌기령도 같이 줄이는 것이 가치함수값을 높일 수 있는 방법이다.

기후변화의 심각성이 높아지면서 탄소시장 활성화를 위한 방편으로 이산화탄소 거래가격은 상승할 것으로 전망된다. 이산화탄소의 거래가격이 높아지면서 소나무의 간벌연령은 증가할 것으로 전망되므로 예상되는 원목가격과의 관계를 감안하여 적절한 수준에서 간벌연령을 조절하여야할 것이다. 또한 소나무의 벌기령은 분석결과인 최적수준보다 더 늘어날 것으로 전망된다. 그러나 잣나무의 경우에는 원목가격 상승을 감안하여 적절하게 조절하는 것이 바람직하다.

표 10. 외생변수와 관리방법의 관계(소나무)

		간벌연령	간벌강도	벌기령	가치함수값
소나무	이자율	−	○	−	−
	원목가격	−	+	○	+
	이산화탄소거래가격	+	○	+	+
잣나무	이자율	+	○	−	−
	원목가격	−	+	−	+
	이산화탄소거래가격	○	○	+	+

주: ‘+’는 증가, ‘−’는 감소의 의미이며, ‘○’은 불변을 의미함.

5. 현행 산림관리 방법과 최적화 방안 비교

산림자원관리 표준메뉴얼에 따르면 수종별 우량중경재(中徑材)를 생산할 목적의 인공 조림지에 대한 작업 방법이 다음과 같다. 두 수종 모두 2차에 걸쳐 간벌을 실시하는

것으로 나타났다. 그러나 어린나무가꾸기의 경우 소나무는 1차, 잣나무는 2차에 걸쳐 실시한다. 초기 식재본수는 소나무가 5,000본이며, 잣나무는 3,000본을 조림한다. 작업강도는 이전 작업에 따른 잔존본수를 기준으로 하여 계산된 비율이다.

표 11. 현행 산림관리 방법

			잔존본수(본)	작업연령(년)	작업강도(%)
소나무	식재본수		5000	-	-
	어린나무가꾸기		2000	8	60.0
	간벌	1차	1000	18	50.0
		2차	600	30	40.0
잣나무	식재본수		3000	-	-
	어린나무가꾸기	1차	2000	10	33.3
		2차	1500	15	25.0
	간벌	1차	800	25	46.7
		2차	400	35	50.0

5.1. 소나무

현행 산림관리 방법을 초기본수 6,000본으로 환산하여 벌기령과 가치함수를 계산하여 보면, 목재의 경제성만 고려한 경우 벌기령은 56년, 가치함수값은 9.22백만 원이 된다. 목재와 탄소의 경제성을 모두 고려하면 벌기령 76년, 가치함수값 13.58백만 원이 되는 것으로 나타났다. 두 경우의 벌기령을 소나무의 일반기준 벌기령인 70년(국유림), 50년(공·사유림)[9]과 비교해보면 공유림과 사유림의 경우 목재의 경제성만 고려한 벌기령과 비슷하나, 국유림은 탄소의 경제성을 포함하여 계산한 벌기령과 비슷한 것으로 나타났다.

그러나 최적화 관리방법을 적용하면 목재의 경제성만 고려한 경우 벌기령은 56년에서 30.4% 줄어든 39년이 되며, 가치함수값은 9.22백만 원에서 84.4% 늘어난 17.01백만 원이 된다(표 7. 표 12). 반면 목재와 탄소의 경제성을 모두 고려하면 벌기령은 36.9% 줄어든 48년이 되고, 가치함수값은 48% 늘어난 20.09백만 원이 되는 것으로 분석되었

9 기준벌기령 및 벌채기준(제7조 제2항 관련)(산림자원의 조성 및 관리에 관한 법률 시행규칙 [별표 3]. 개정 2010. 8. 5.).

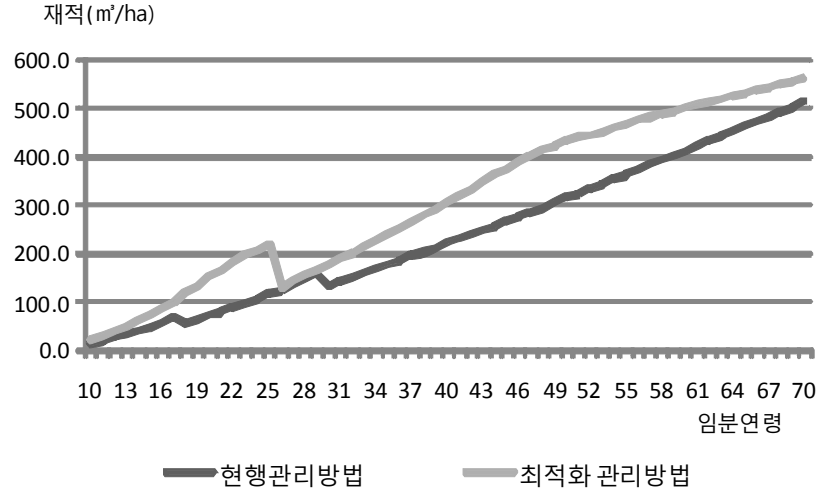
다. 생리학적인 성장요인을 감안하여 어린나무가꾸기를 실시하더라도 목재의 경제성만 고려한 경우의 벌기령은 23.2% 줄어들고, 가치함수값은 72.9% 늘어났다. 목재와 탄소의 경제성을 모두 고려하면 벌기령은 36.8% 줄어들고 가치함수값은 41.1% 늘어난다.

표 12. 현행 소나무산림관리지침의 최대가치함수값 및 벌기령

단위: 년, %, 백만 원

작업	고려인자	시행연령	시행강도	최대가치함수값	벌기령
어린나무 가꾸기 +간벌	목재	8	60	9.222	56
		15	50		
		30	40		
	목재+CO_2	8	60	13.579	76
		15	50		
		30	40		

그림 2. 최적관리와 현행관리방법에 따른 재적성장 차이(소나무)



이러한 결과를 나타내는 원인은 현행관리 방법에 따를 경우 (그림 2)와 같이 재적성장이 느려지고, 2차간벌 시기가 늦어짐에 따라 벌기령이 길어지면서 상대적인 할인요인이 크게 작용하여 최적관리 방법에 비해 가치함수값이 떨어지기 때문이다. 또한 현행관리 방법의 경우 느린 재적성장과 함께 2차에 걸친 간벌비용을 회복할 기간이 오래 걸리게 된다. 따라서 목재와 탄소의 경제성을 고려한 산림관리를 위해서는 현행 벌기령은 줄이고, 간벌은 1회에 걸쳐 강하게 시행하며(간벌연령은 26년으로 정하고) 어린나무가꾸기가 필요한 경우에는 나무가 잘 자랄 수 있는 주변정리 수준의 약한 강도에서 되도록 늦게 실시하는 것이 유리하다.

5.2. 잣나무

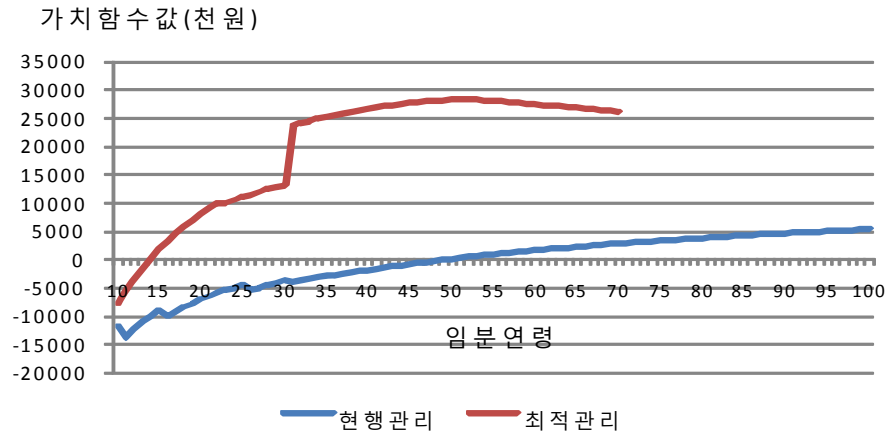
소나무와 마찬가지로 현행 산림관리 방법을 초기본수 6,000본으로 환산하여 벌기령과 가치함수를 계산하여 보면, 목재의 경제성만 고려한 경우 가치함수값은 음의 값을 가지며, 그 값은 약 -1.70백만 원이 된다. 4차에 걸친 작업비용을 100년이 넘도록 회복하지 못하기 때문이다. 목재와 탄소의 경제성을 모두 고려하면 최적벌기령은 165년이며, 이때 가치함수값은 7.59백만 원이 되는 것으로 나타났다. 목재의 경제성과 탄소의 경제성이 모두 감소하면서 증가하므로 최적벌기령은 100년이 넘는 것으로 분석되었다.[10]

표 13. 현행 잣나무산림관리지침의 최대가치함수값 및 벌기령

단위: 년, %, 백만 원

작업	고려인자	시행연령	시행강도	최대가치함수값	벌기령
어린나무 가꾸기 +간벌	목재	10	33.3	-1.703	128
		15	25.0		
		25	46.7		
		35	50		
	목재+CO_2	10	33.3	7.593	165
		15	25.0		
		25	46.7		
		35	50		

그림 3. 최적관리와 현행관리방법에 따른 가치함수값 추이(잣나무)



10 분석을 위해 이용한 동적임분생장모델은 100년까지의 결과만 제공하기 때문에 100년을 초과하는 벌기령에 대해서는 임분연령 90년~100년까지의 가치합수값 연간 증가율을 적용하여 계산하였음.

잣나무의 일반기준벌기령인 70년(국유림), 60년(공·사유림)[11]과 비교해보면 공·사유림 및 국유림 모두 최적벌기령보다 매우 낮다는 것을 알 수 있다.

최적화 관리방법을 적용하면 목재의 경제성만 고려한 경우 벌기령은 128년에서 62.5% 줄어든 48년이 되며, 가치함수값은 -1.70백만 원에서 1,537% 늘어난 24.48백만 원이 된다. 반면 목재와 탄소의 경제성을 모두 고려하면 벌기령은 68.5% 줄어든 52년이 되고, 가치함수값은 274% 늘어난 28.41백만 원이 되는 것으로 분석되었다(표 8 참조).

잣나무의 경우 타수종에 비해 관리작업의 횟수가 많으며 임분연령 35년까지 계속되므로 작업비용을 회복하는 데 많은 시간이 걸린다. 특히 목재만 고려했을 경우에는 비용을 회복하지 못하는 것으로 나타났다. 따라서 작업 횟수를 줄이고 연령도 낮출 필요가 있다. 또한 소나무와 같이 벌기령을 낮추고 어린나무가꾸기도 필요한 경우에 한해 약하게 시행하는 것이 유리하다.

6. 요약 및 결론

본 연구에서는 기후변화협약에 따라 산림의 가치가 증대되고 있음에 따라 산림관리 방안에 목재와 탄소의 가치를 포함하는 최적산림관리방안을 도출하였다. 산림관리 최적화분석 결과, 간벌만 적용한 소나무 임분에서 목재와 탄소의 경제성을 동시에 고려하면 목재의 경제성만을 고려했을 때보다 간벌연령은 증가하고 벌기령도 늘어난 것으로 분석되었다. 반면 잣나무 임분의 경우 간벌연령은 변화가 없으나 벌기령이 늘어난 것으로 나타났다. 어린나무가꾸기와 간벌을 순차적으로 실시하는 복합관리방법의 경우 어린나무가꾸기는 임분연령 14년에 20%의 강도로 실시하는 것이 소나무와 잣나무 모두에게 유리하다. 이때 소나무 간벌은 48년에 65%의 강도로 실시하며, 잣나무 간벌은 58년에 70%로 실시하는 것이 가장 적정한 관리방법인 것으로 나타났다. 벌기령은 목재의 경제성만 고려한 경우보다 소나무 11.6%, 잣나무 23.4% 늘어난다. 즉 산림관리에 있어 목재와 탄소의 경제성을 동시에 고려한 경우와 간벌만 실시한 경우에서 최대가치함수값을 갖는 것으로 나타났다.

소나무의 현행 산림관리 방법에 따른 최대가치함수값과 벌기령을 최적화 방안의 분

11 기준벌기령 및 벌채기준(제7조 제2항 관련)(산림자원의 조성 및 관리에 관한 법률 시행규칙 [별표 3]. 개정 2010.8.5.).

석결과와 비교해보면 목재의 경제성만 고려한 경우 벌기령은 56년에서 39년으로 줄고, 가치함수값은 9.22백만 원에서 17.01백만 원으로 증가한다. 반면 목재와 탄소의 경제성을 모두 고려하면 벌기령은 76년에서 48년으로 줄고, 가치함수값은 13.58백만 원에서 20.09백만 원으로 증가하는 것으로 분석되었다. 생리학적인 성장요인을 감안하여 어린나무가꾸기를 실시하더라도 목재의 경제성만 고려한 경우의 벌기령은 23.2% 줄어들고, 가치함수값은 72.9% 늘어났다. 목재와 탄소의 경제성을 모두 고려하면 벌기령은 36.8% 줄어들고 가치함수값은 41.1% 늘어난 것으로 분석되었다. 따라서 목재와 탄소의 경제성을 고려한 산림관리를 위해서는 현행 벌기령은 줄이고, 간벌은 1회에 걸쳐 강하게 시행하며 간벌연령은 26년으로 정하고, 어린나무가꾸기는 나무가 잘 자랄 수 있는 주변정리 수준에서 그쳐야할 것이다.

잣나무의 현행 산림관리 방법에 따른 최대가치함수값과 벌기령을 최적화 방안의 분석결과와 비교해보면 벌기령은 128년에서 48년으로 줄고, 가치함수값은 -1.70백만 원에서 24.48백만 원으로 증가하는 것으로 나타났다. 반면 목재와 탄소의 경제성을 모두 고려하면 벌기령은 68.5% 줄어든 52년이 되고, 가치함수값은 274% 늘어난 28.41백만 원이 되는 것으로 분석되었다. 잣나무의 경우 타수종에 비해 관리작업의 횟수가 많으며, 임분연령 35년까지 작업이 계속되므로 비용을 회복하는 데 많은 시간이 걸린다. 특히 목재의 경제성만 고려했을 경우에는 비용을 회복하지 못하는 것으로 나타났다. 따라서 기 작업 횟수를 줄이고 연령도 낮추는 것이 필요하다. 또한 소나무와 같이 벌기령을 낮추고 어린나무가꾸기도 필요한 경우에 한해 약하게 시행하는 것이 유리하다.

분석결과를 요약하면 탄소가치를 고려한 산림관리 최적화 방안은 산림관리에 있어 목재와 탄소의 경제성을 동시에 고려할 필요가 있으며, 소나무와 잣나무의 경우 현행 산림관리지침보다 어린나무가꾸기를 약하게 실시하고, 간벌은 높은 강도로 실시하되 횟수를 줄여야하며, 벌기령은 낮추어야할 필요가 있다.

이 연구는 산림경제 분야 최고의 관심사 중에 하나인 최적벌기령 산정에 관한 문제를 동태분석이론에 입각하여 분석하였다. 목재생장에 관한 실제 자료의 부재로 모델을 이용하여 계산한 자료를 사용하긴 하였지만 분석결과가 이론에서 예상했던 바와 같이 도출된 것을 확인할 수 있었다. 매트랩(Matlab)과 같은 고급 프로그램을 이용하여 더 정확하고 도식화된 최적화 조건의 도출과 경제학적 직관에 부응하는 분석은 추후 과제로 남겨둔다.

참고 문헌

김점수. 2009.「기후변화 대응 및 산림가치 증대를 위한 탄소흡수원 확보방안」. 강원발전연구원 연구보고. 08-10.

김준순. 2004. “기후변화협약에 따른 국내임업의 대응방안.” 산림경제 12(2): 58-67.

산림청. 국립산림과학원. 2005.「지속가능한 산림자원관리 표준매뉴얼」. 국립산림과학원.

산림청. 2009.「기후변화와 산림」. 산림청.

이우균. 1995. “산림시업의 지속성을 위한 동적 지역산림경영모델: 산림생장 및 경제적 여건을 고려한.” 산림경제연구 3(1): 71-98.

장남정, 김보국, 모영환, 유승수. 2008.「기후변화협약 대응을 위한 전라북도 온실가스 저감전략」. 2008-R-17. 전북발전연구원.

정성호, 정두진, 박병수, 전수경. 2003. “간벌이 한국산 잣나무의 용재품질에 미치는 영향.” 목재공학 31(2): 16-23.

황재홍. 2009. “탄소저장 증진을 위한 산림경영.” 월간 산림(2009년 12월호). pp. 82-86.

Cowie, A. L., Miko Kirschbaum, and Murray Ward. 2007. “Options for including all lands in a future greenhouse gas acounting framework.” *Environmental Science & Policy*. 10(4): 306-321.

Malmsheimer, R. W. et al. 2008. “Forest management solutions for mitigating climate change in the United States.” *Journal of Forestry* 106(3): 115-173.

Miranda, Mario J. and Fackler, Paul L. 2002. *Applied Computational Economics and Finance*. MIT Press.

원고 접수일: 2011년 9월 15일
원고 심사일: 2011년 9월 22일
심사 완료일: 2011년 10월 19일